

Universität Leipzig
Fakultät für Physik und Geowissenschaften
Institut für Geographie

**Stickstoffhaushalt und sickerwassergebundener Stickstoffaustrag
bei konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung**

Ein Untersuchungsbeispiel aus dem Mittelsächsischen Lößhügelland unter besonderer
Berücksichtigung des Reliefeinflusses und des C/N – Verhältnisses

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom – Geograph (Dipl. – Geogr.)

vorgelegt von

Enrico Thiel aus Leipzig

1. Betreuer: Prof. Dr. habil Hans Neumeister
2. Betreuer: Dr. Walter A. Schmidt

Leipzig, den 04.09.2002

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten:

1. Freistaat Sachsen, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)

An der geistigen Herstellung der vorliegenden Diplomarbeit war außer mir niemand beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe eines Diplomberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar, noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorliegenden Diplomarbeit stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise einer Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ich erkläre mich einverstanden, dass meine Diplomarbeit nach positiver Begutachtung in der Zweigstelle Geographie der Universitätsbibliothek Leipzig zur Benutzung zur Verfügung steht.

Veröffentlichungen über die Diplomarbeit hinaus dürfen nur mit Zustimmung der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft erfolgen.

Enrico Thiel

Leipzig, den 04.09.2002

Danksagung

Herrn Prof. Dr. Hans Neumeister (Institut für Geographie) danke ich für die Betreuung und Anleitung sowie interessante und anregende Gespräche.

Herrn Dr. Walter A. Schmidt (Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft) danke ich recht herzlich für die Überlassung des Themas und die Übernahme der Betreuung.

Ferner danke ich allen Mitarbeitern des FB 4 der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Referat Rekultivierung und Bodenschutz, für das angenehme und herzliche Arbeitsklima. Für ständige Diskussionsbereitschaft und konstruktive Zusammenarbeit danke ich den Mitarbeitern des FB 4 Hr. Ulrich Gierke, Fr. Beatrix Greifenhagen und Hr. Berno Zimmerling. Hilfreiche Anregungen zu Beginn meiner Arbeit erhielt ich von Fr. Dr. Stefanie Krück. Mein spezieller Dank für kritische und konstruktive Anregungen und jederzeitige Diskussionsbereitschaft bei Problemen und offenen Fragen gilt Hr. Dr. Olaf Nitzsche.

Weiterhin danke ich Fr. Heimann und Fr. Kürschner stellvertretend für die Mitarbeiter des FB 10 (LUFA) für die Durchführung der chemischen Analysen meiner Proben.

Der Bibliothekarin Fr. Bikfalvi sei besonders für die unermüdliche Unterstützung bei Recherchen und der Organisation von entsprechender Literatur gedankt.

Dank auch an das IFZ Göttingen und die Südzucker AG für die Übergabe von Datenmaterial und Bereitstellung von Untersuchungsflächen.

Beim Leiter des Gutes Lüttewitz, Herrn E. Steigerwald, möchte ich mich für die Unterstützung vor Ort und für das Überlassen von benötigtem Datenmaterial bedanken. Herrn M. Bähr und Herrn Dr. C. Kersebaum vom ZALF Müncheberg möchte ich meinen Dank für die unkomplizierte und schnelle Bereitstellung von Klimadaten aussprechen.

Nicht zu vergessen ist mein Kommilitone Oliver Spott, welcher mir besonders bei der Probenahme hilfreich zur Seite stand.

Dank an meine Partnerin Susanne Specht, deren Motivation wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beitrug.

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	VI
Abbildungsverzeichnis.....	VII
Anhangsverzeichnis.....	IX
Zusammenfassung.....	X
1 Einleitung.....	1
1.1 Stellung der Nitratauswaschung im Stickstoffkreislauf des Bodens.....	1
1.2 Stand der Forschung.....	2
1.2.1 Stickstoffkreislauf im Boden.....	2
1.2.2 Stickstoffhaushalt bei unterschiedlichen Intensitäten der Bodenbearbeitung....	7
1.2.3 Rechtlicher Rahmen.....	11
2 Problemstellung.....	13
2.1 Einordnung der Untersuchung in ein laufendes Projekt der LfL.....	13
2.2 Zielsetzung des Untersuchungsprogramms.....	13
3 Charakterisierung des Untersuchungsgebietes.....	15
3.1 Geographische Lage.....	15
3.2 Lage im Makrorelief.....	16
3.3 Geologische Verhältnisse.....	18
3.4 Klimatische Verhältnisse.....	19
3.5 Pedologische Verhältnisse.....	20
3.6 Bewirtschaftungsdaten des Standortes.....	21
3.6.1 Bodenbearbeitungsvarianten.....	21
3.6.2 Bewirtschaftung im Untersuchungszeitraum.....	23
4 Methodik.....	24
4.1 Untersuchungskonzept.....	24
4.2 Bodenphysikalische Untersuchungsmethoden.....	27
4.3 Bodenchemische Untersuchungsmethoden.....	29
4.4 Wasserhaushaltsuntersuchungen.....	31
4.4.1 Witterungsverlauf im Untersuchungszeitraum.....	31
4.4.2 Kennzeichnung des Bodenwasserhaushaltes.....	35
4.5 Digitale Reliefanalyse.....	41
5 Ergebnisse.....	43
5.1 Bodenphysikalische Ergebnisse.....	43
5.2 Bodenchemische Ergebnisse.....	46
5.2.1 Nmin-Gehalte der Bodenproben.....	46
5.2.2 Nmin-Gehalte der Bodenlösung.....	56
5.2.3 Humusgehalte und C/N-Verhältnisse.....	62
5.3 Auswertung des Wasserhaushaltes.....	78
5.3.1 Witterungsverlauf.....	78
5.3.2 Bodenwasserhaushalt.....	82
5.3.2.1 Wassergehalt und Wasserspannung.....	84
5.3.2.2 Sickerwassermengen.....	98
5.4 Reliefeigenschaften.....	106
6 Diskussion.....	115
6.1 Diskussion der Methoden.....	115
6.1.1 Bodenphysikalische und bodenchemische Untersuchungsmethoden.....	115
6.1.2 Methoden der Wasserhaushaltsuntersuchungen.....	117
6.1.3 Methoden der Reliefanalyse.....	118
6.2 Bewertung der Ergebnisse.....	119
7 Literaturverzeichnis.....	145
8 Anhang.....	157

Abkürzungsverzeichnis

DGM	Digitales Geländemodell
DGPS	Differentiell Global Positioning System
gfP	gute fachliche Praxis
GIS	Geographisches Informationssystem
GOF	Geländeoberfläche
max.	maximal
min.	mindestens
PE	Polyethylen
TDR	Time-Domain Reflectometry
UL	Umweltgerechte Landwirtschaft
Variante D	Bodenbearbeitungssystem Direktsaat
Variante K	Bodenbearbeitungssystem Konservierend
Variante KL	Bodenbearbeitungssystem Konservierend Locker
Variante P	Bodenbearbeitungssystem Pflug (konventionelle Bearbeitung)
WW	Winterweizen
ZR	Zuckerrüben

Institutionen

BMVEL	Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft
DVWK	Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau in der Landwirtschaft
DWD	Deutscher Wetterdienst
EG	Europäische Gemeinschaft
EU	Europäische Union
FB 10	Fachbereich 10 der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft
FB 4	Fachbereich 4 der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft
IfZ	Institut für Zuckerrübenforschung Göttingen
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
LfL	Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft
LFUG	Landesamt für Umwelt und Geologie
LUFA	Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalten
LVZ	Leipziger Volkszeitung
SML	Sächsisches Staatsministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Forsten
ZALF	Zentrum für angewandte Agrarlandschaftsforschung Müncheberg

Einheiten, Formeln, Parameter

$\Delta \phi/\psi$	hydraulischer Gradient
ΔpL	Sättigungsdefizit in hPa
ϕ	hydraulisches Potenzial
ψ	Matrixpotenzial in hPa oder cm Wassersäule
$^{\circ}C$	Grad Celsius
μm	Mikrometer
cm WS	cm Wassersäule
Corg	organischer Kohlenstoffgehalt
Ct	Gesamtgehalt an Kohlenstoff
d_B	Trockenrohdichte
d_F	Dichte der festen Bodensubstanz
e	Dampfdruck der Luft in hPa

e_s	maximaler Dampfdruck der Luft in hPa
ETakt	aktuelle Evapotranspiration
ETpot	potentielle Evapotranspiration
FK	Feldkapazität
FS	Festsubstanz
ha	Hektar
hPa	Hektopascal
KAK	Kationenaustauschkapazität
KWB	Klimatische Wasserbilanz
LK	Luftkapazität
Masse-%	Prozentanteil an der untersuchten Gesamtmasse (auch Gew.-%)
max. WK	maximale Wasserkapazität
N	Niederschlag
nFK	nutzbare Feldkapazität
nFKWe	nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes
NH_4^+	Ammonium
Nmin	Gehalt an mineralischem Stickstoff ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$)
NO_2^-	Nitrit
NO_3^-	Nitrat
Nt	Gesamtgehalt an Stickstoff
OBS	organische Bodensubstanz
OPS	organische Primärsbstanz
pF	pF-Wert, Maß für die Saugspannung des Wassers im Boden
PWP	permanenter Welkepunkt
TW	Totwasser
U	relative Luftfeuchte in %
z	Gravitationspotenzial in cm

Tabellenverzeichnis

Tab. 1.	verwendete HAUDE-Faktoren nach LÖPMEIER (1994).....	34
Tab. 2.	Grenzwassergehalte der einzelnen Bodenbearbeitungsvarianten und Tiefen.....	37
Tab. 3.	Tage mit errechnetem Oberflächenabfluss nach EROSION 2D.....	39
Tab. 4.	Gewässergefährdungspotenzial nach FREDE & DABBERT (1998).....	59
Tab. 5.	Mittel der Humusgehalte im Untersuchungszeitraum von 1999 – 2001....	66
Tab. 6.	Höhenschichtenangepasste Gruppierung der Probenahmepunkte.....	66
Tab. 7.	durchschnittliche Humusgehalte der flächenhaften Beprobung.....	70
Tab. 8.	Corg- und Nt-Gehalte am Referenzpunkt.....	77
Tab. 9.	Sickerwassermengen der Ebene 80 cm – kalibriert durch den hydraulischen Gradienten.....	102

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.	Stickstoffkreislauf in der Agrarlandschaft.....	4
Abb. 2.	Lage des Untersuchungsschlages in Sachsen.....	15
Abb. 3.	Lage der Untersuchungsfläche im Makrorelief.....	17
Abb. 4.	Einzugsgebiet Schlag Lüttewitz.....	18
Abb. 5.	Geologische Verhältnisse Schlag Lüttewitz.....	19
Abb. 6.	Pedologische Verhältnisse.....	20
Abb. 7.	Die Untersuchungsmethodik – verwendete Daten und ihre Quellen.....	25
Abb. 8.	Unverzichtbare Kategorien bei geographischen Untersuchungen - Hierarchieebenen.....	26
Abb. 9.	Beprobungsraster der flächenhaften Untersuchung.....	28
Abb. 10.	Ermittlung des Grenzwassergehaltes (FK) – Beispiel Variante Pflug 80 cm Tiefe.....	36
Abb. 11.	Kenngrößen des Luft- und Wasserhaushaltes – Variante P 1999.....	44
Abb. 12.	Kenngrößen des Luft- und Wasserhaushaltes – Variante D 1999.....	44
Abb. 13.	Bodentemperatur in 5 cm Tiefe 1999.....	45
Abb. 14.	Nmin-Gehalte der Bodenproben der Variante P.....	47
Abb. 15.	Nmin-Gehalte der Bodenproben der Variante D.....	48
Abb. 16.	Nmin-Gehalte der Bodenproben der Variante K.....	49
Abb. 17.	Nmin-Gehalte der Bodenproben der Variante KL.....	49
Abb. 18.	Nmin-Gehalte der Bodenbearbeitungsvarianten im Vergleich.....	50
Abb. 19.	Nitratgehalte in der Tiefe 60 – 90 cm.....	52
Abb. 20.	Veränderung des NO ₃ -Gehaltes der Bodenproben über die Winterperioden 1999 in der Variante P.....	53
Abb. 21.	Veränderung des NO ₃ -Gehaltes der Bodenproben über die Winterperioden 1999 in der Variante D.....	54
Abb. 22.	Nmin-Gehalte der Bodenlösung der Variante P.....	56
Abb. 23.	Nmin-Gehalte der Bodenlösung der Variante K.....	58
Abb. 24.	Nitratgehalte der Bodenlösungen im Vergleich.....	59
Abb. 25.	pH-Werte in den Bodenbearbeitungsvarianten im Jahr 2000.....	62
Abb. 26.	Humusgehalte der Variante P von 1999 bis 2001.....	64
Abb. 27.	Humusgehalte der Variante K von 1999 bis 2001.....	65
Abb. 28.	Humusgehalte [Gew.-%] der Tiefe 0 – 5 cm im Mikrorelief.....	67

Abb. 29.	Humusgehalte [Gew.-%] der Tiefe 5 - 30 cm im Mikrorelief.....	69
Abb. 30.	Humusgehalte [Gew.-%] der Krume im Mikrorelief.....	70
Abb. 31.	Erosionsprozesse innerhalb der Zwischenstrukturen.....	71
Abb. 32.	Entwicklung des C/N-Verhältnisses in der Variante P von 1999 bis 2001.....	72
Abb. 33.	Entwicklung des C/N-Verhältnisses in der Variante D von 1999 bis 2001.....	73
Abb. 34.	C/N-Verhältnis der Tiefe 0 – 5 cm – flächenhafte Beprobung.....	75
Abb. 35.	C/N-Verhältnis der Tiefe 5 – 30 cm – flächenhafte Beprobung.....	76
Abb. 36.	Witterungskennwerte der Jahre 1999 bis 2001 der Station Lüttewitz.....	78
Abb. 37.	Niederschläge des Jahres 2001 im Vergleich.....	80
Abb. 38.	Vergleich der ETpot der Wetterstationen Lüttewitz und Nossen.....	81
Abb. 39.	Vergleich der ETpot und ETakt.....	81
Abb. 40.	KWB der Jahre 1999 bis 2001 – Station Lüttewitz.....	82
Abb. 41.	Bodenwasserhaushalt der Varianten P, D, K und KL im Untersuchungszeitraum.....	84
Abb. 42.	Wassergehalt der Ebene 30 cm in den Jahren 1999 bis 2001.....	89
Abb. 43.	Wassergehalt der Ebene 60 cm in den Jahren 1999 bis 2001.....	91
Abb. 44.	Wassergehalt der Ebene 80 cm in den Jahren 1999 bis 2001.....	92
Abb. 45.	Saugspannungen der Tiefe 30 cm von 1999 bis 2001.....	95
Abb. 46.	Saugspannungen der Tiefe 60 cm von 1999 bis 2001.....	96
Abb. 47.	Saugspannungen der Tiefe 80 cm von 1999 bis 2001.....	97
Abb. 48.	Sickerwassermengen der Ebene 30 cm – Zeitraum 1999 bis 2001.....	99
Abb. 49.	Sickerwassermengen der Ebene 60 cm – Zeitraum 1999 bis 2001.....	100
Abb. 50.	Hydraulische Gradienten der Ebene 80 – 100 cm – Zeitraum 1999 bis 2001.....	102
Abb. 51.	Höhenschichten Schlag Lüttewitz.....	107
Abb. 52.	Hangneigung Schlag Lüttewitz.....	108
Abb. 53.	potenzielle Fließbahnen Schlag Lüttewitz.....	109
Abb. 54.	Divergenz- und Konvergenzbereiche Schlag Lüttewitz.....	110
Abb. 55.	Mächtigkeit der reliefbeeinflussten Bodenhorizonte.....	112

Anhangsverzeichnis

Tabellen

Tab. A 1.	Bewirtschaftungsdaten im Untersuchungszeitraum Variante P.....	157
Tab. A 2.	Bewirtschaftungsdaten im Untersuchungszeitraum Variante D.....	158
Tab. A 3.	Bewirtschaftungsdaten im Untersuchungszeitraum Variante K.....	159
Tab. A 4.	Bewirtschaftungsdaten im Untersuchungszeitraum Variante KL.....	160

Abbildungen

Abb. A 1.	Agrarökosystem Schlag Lüttewitz.....	161
Abb. A 2.	Nmin-Gehalte der Tiefe 0 – 30 cm im Vergleich.....	162
Abb. A 3.	Nmin-Gehalte der Tiefe 30 – 60 cm im Vergleich.....	162
Abb. A 4.	Nmin-Gehalte der Tiefe 60 – 90 cm im Vergleich.....	162
Abb. A 5.	Veränderung des NO ₃ -Gehaltes der Bodenproben über die Winterperioden 1999 und 2000 in der Variante K.....	163
Abb. A 6.	Veränderung des NO ₃ -Gehaltes der Bodenproben über die Winterperioden 1999 und 2000 in der Variante KL.....	163
Abb. A 7.	Vergleich der NO ₃ -Gehalte der Saugkerzen und Bodenproben – Variante P.....	164
Abb. A 8.	Vergleich der NO ₃ -Gehalte der Saugkerzen und Bodenproben – Variante D.....	164
Abb. A 9.	Vergleich der NO ₃ -Gehalte der Saugkerzen und Bodenproben – Variante K.....	164
Abb. A 10.	Vergleich der NO ₃ -Gehalte der Saugkerzen und Bodenproben – Variante KL.....	165
Abb. A 11.	Humusgehalte der Variante D von 1999 bis 2001.....	165
Abb. A 12.	Humusgehalte der Variante KL von 1999 bis 2001.....	165
Abb. A 13.	Humusgehalte der Tiefe 30 – 60 cm im Mikrorelief.....	166
Abb. A 14.	Wölbungstendenz Schlag Lüttewitz.....	166

Zusammenfassung

Im Mittelsächsischen Lößhügelland wurden die Bodenbearbeitungssysteme Pflug (P), Direktsaat (D), Konservierende Bearbeitung (K) und Konservierende Bearbeitung mit Tiefenlockerung (KL) hinsichtlich ihres N-Haushaltes und Wasserhaushaltes auf einer Parabraunerde untersucht. Ziel der Untersuchung war die Erfassung und Bewertung von Unterschieden im Nitrataustrag.

Als Untersuchungsfläche stand ein Praxisschlag in der Lommatzcher Pflege mit ca. 6 ha großen Parzellen zur Verfügung. Die Umstellung der konventionellen Bodenbewirtschaftung lag 7 Jahre zurück. Die Fruchtfolge des Untersuchungszeitraumes von 1999 bis 2001 bestand aus ZR-WW-WW. Im Hinblick auf den N-Haushalt wurden 3-jährige Messreihen und eine flächenhafte Untersuchung gekoppelt. Die Verbindung der Zeitparameter von 3 Untersuchungsjahren und der Raumparameter mittels digitaler Reliefanalyse ist elementarer Bestandteil der vorliegenden Arbeit.

Im Frühjahr wies Variante P, bedingt durch die geförderte herbstliche Mineralisation, erhöhte N_{min} -Werte im Vergleich zu den Varianten D, K und KL auf. Die Unterschiede des N_{min} -Gehaltes zwischen den Varianten waren größer, wenn Zwischenfrüchte angebaut und diese im Herbst eingearbeitet wurden. Die Angleichung der N_{min} -Gehalte im Jahresverlauf dauerte nach Zwischenfruchtanbau länger als ohne diesen. In den zwei Winterperioden wurden in der Variante Pflug ca. 10 kg N/ha und in den zwei Frühjahrsperioden ca. 1,7 kg N/ha mehr als in der Variante Konservierend ausgetragen. Die Werte der Variante Konservierend Locker lagen im Mittel. Die Variante Direkt wies geringe winterliche aber teilweise hohe Frühjahrsausträge auf. Der Sickerwasseranfall und die Nitratfracht wurden mittels eines einfachen Sickerwasseransatzes berechnet.

Durch eine flächenhafte Auswertung der C/N-Verhältnisse und anhand einer Reliefanalyse konnten in allen Bodenbearbeitungsvarianten Reliefeinflüsse nachgewiesen werden. Im Hinblick auf die gewonnenen Ergebnisse der Reliefanalyse und des Nitrataustrages sowie dem bekannten Erosionsschutzeffekt einer nichtwendenden Bodenbearbeitung, ist die Anwendung der Variante K gerade in einem stark vom Mikrorelief geprägtem Gebiet wie dem Mittelsächsischen Lößhügelland unbedingt zu empfehlen. Ausgehend von einer Teilregion der Lommatzcher Pflege sind die Ergebnisse auf andere Schlageinheiten mit ähnlichen Eigenschaften übertragbar.

1 Einleitung

1.1 Stellung der Nitratauswaschung im Stickstoffkreislauf des Bodens

Nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1982) nimmt der Stickstoff eine besondere Stellung unter den Nährstoffen ein. Der Stickstoffbedarf der Pflanzen ist im Vergleich zu anderen Nährstoffen am höchsten und vor allem in Mitteleuropa ist der Stickstoff der Böden der Nährstoff, welcher den Ertrag am stärksten bestimmt.

Nitrat besitzt im komplexen Stickstoffhaushalt des Bodens eine zentrale Stellung. Es ist die von Pflanzen bevorzugt aufgenommene Stickstoffform und sehr leicht aus dem Boden auswaschbar. Durch Stickstoffüberschuss im Boden kann es u.a. zu Nitratauswaschung ins Grundwasser kommen. Bei Einträgen in Oberflächengewässer sind Eutrophierung, Abnahme der Artenvielfalt, Gefährdung der Trinkwassergewinnung und Badenutzung, Verdrängung empfindlicher Gewässerorganismen, sowie toxische Effekte auf die Makrofauna bei erhöhten Ammonium- und Ammoniakgehalten möglich (FREDE & DABBERT, 1998).

Nach CZERATZKI (1973) können mit den Mitteln der Bodenbewirtschaftung, wie Kulturart, Fruchtfolge, Düngung und Bodenbearbeitung die Einflussfaktoren der N-Auswaschung langfristig beeinflusst werden, wobei die Erhaltung des Bodens und seiner Fruchtbarkeit im Vordergrund stehen sollte.

Durch verschiedene Bodenbearbeitungssysteme kann das Bodengefüge beeinflusst werden. Aus einem veränderten Bodengefüge resultieren modifizierte Stoffumsatzbedingungen (BEI-SECKER, 1994) Die Dynamik des komplexen Stickstoffhaushaltes ist gekennzeichnet von zahlreichen, gleichzeitig ablaufenden, sich gegenseitig beeinflussenden Prozessen. Einen Teilbereich dieser Prozesse unter genauen definierten geökologischen Gesichtspunkten zu betrachten, ist Gegenstand der vorliegenden Diplomarbeit. Es werden die Wirkungen unterschiedlicher Intensitäten der Bodenbearbeitung auf die Nitratauswaschung untersucht.

Die konservierende Bodenbearbeitung ist durch eine zur konventionellen Bodenbearbeitung verringerte Bearbeitungsintensität gekennzeichnet. Konservierende Bodenbearbeitung wird in den letzten Jahren verstärkt in der Praxis eingesetzt, um Wind- und Wassererosion zu vermindern, die Tragfähigkeit des Bodens zu erhöhen und Arbeitskosten einzusparen (BRUNOTTE, 1991). Nach Angaben von GARCÍA-TORRES et al. (2001) werden in Europa gegenwärtig

nur geringe Anteile der landwirtschaftlichen Nutzfläche konservierend bearbeitet, wobei die Länder Spanien und Portugal mit 10 - 15 % führend sind. In Sachsen werden gegenwärtig ca. 30 % der Ackerfläche konservierend bewirtschaftet (BMVEL, 2001). Insgesamt sind ca. 60 % der Ackerfläche Sachsens durch Wassererosion und ca. 20 % der Ackerfläche durch Winderosion gefährdet (SCHMIDT et al., 2000). Hier bietet die konservierende Bodenbearbeitung Schutzpotenziale.

Die Akzeptanz ist nach FRIELINGHAUS et al. (1997) in den europäischen Ländern noch gering. Die Autoren führen dies auf noch nicht ausreichende standortspezifische Erfahrungen zurück. Wenig standortspezifische Erfahrungen sind auf dem Gebiet des Nitrataustrages bei konservierender Bodenbearbeitung vorhanden. An dieser Stelle soll die vorliegende Diplomarbeit einen Beitrag leisten, den N-Austrag in einer charakteristischen sächsischen Landschaftsform bei unterschiedlicher Bodenbearbeitungsintensität darzustellen.

Nach NEUMEISTER (1976) sind zahlreiche Elemente und Verbindungen in angemessener Konzentration lebensnotwendige Bioelemente, wirken aber durch hohe Konzentrationen toxisch und stellen somit Schadstoffe dar. Naturraumeigenschaften sind für die Wirkungsmöglichkeiten bestimmter Fremdstoffe von großer Bedeutung.

In der Diplomarbeit wird die auswaschungsgefährdete Stickstoffverbindung Nitrat betrachtet. Dabei wurden die Eigenschaften des Landschaftsraumes durch eine Reliefanalyse in die vorliegende Untersuchung einbezogen. Das stoffhaushaltliche Geschehen des Agroökotopes wird in Beziehung zu Problemen der Landwirtschaftspraxis gesetzt. Dabei werden verschiedene Geoökofaktoren untersucht, welche in der Agrarlandschaft wirksam werden.

1.2 Stand der Forschung

1.2.1 Stickstoffkreislauf im Boden

Der Stickstoffkreislauf wird in zahlreichen Werken explizit erläutert. An dieser Stelle sei auf die Arbeiten von SCHMALFUß (1958), DVWK (1985), RIEß (1993), SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1998) verwiesen. In diesen Werken finden sich Mengenangaben zu den einzelnen Umsatzprozessen.

Im Folgenden werden grundlegende Prozesse aufgeführt, welche durch die Intensität der Bodenbearbeitung in verschiedenster Weise beeinflusst werden und somit Variationen im Stickstoffhaushalt des Bodens auslösen können. Die grundlegenden Prozesse verdeutlicht schematisch die Abb. 1. Da in der vorliegenden Arbeit keine Bilanzierung erfolgt, werden die Mengenangaben hier nicht aufgeführt.

Stickstoff liegt im Boden im Wesentlichen in 3 Arten vor. Diese Formen sind organische N-Verbindungen, Ammonium (NH_4^+) und Nitrat (NO_3^-). Den Hauptanteil von ca. 90 - 95 % machen organische N-Verbindungen aus (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 1998). Diese organischen N-Verbindungen liegen bis zu 60 % in Form von Aminosäuren, bis zu 15 % in Form von Amiden sowie bis zu 15 % in Form von Aminoazuckern vor. Diese N-Verbindungen sind relativ leicht abbaubar. Bis max. 30 % können die organischen N-Verbindungen aber auch als schwer abbaubare, nicht hydrolysierbare Verbindungen, wie Huminstoffe, vorliegen (STADELMANN et al., 1981, zit. n. RIEß, 1993).

Aus diesem Reservoir der organischen N-Verbindungen wird durch mikrobielle Umsetzungen Ammonium gebildet, welches über Nitrit (NO_2^-) zu Nitrat (NO_3^-) oxidiert wird. Diese Umsetzungen kennzeichnen den Hauptpfad des Stickstoffkreislaufs.

Grundprozesse

Der 1. Schritt der Umwandlung von organischen N-Verbindungen ist die Mineralisation, auch als Ammonifikation bezeichnet (Abb. 1). Nach Spaltung der vorliegenden Makromoleküle organischer N-Verbindungen entsteht Ammoniak (NH_3), welcher sich im Bodenwasser unter Bildung von Ammoniumionen löst. Viele Bakterien und Pilze können diesen Schritt unter aeroben und anaeroben Bedingungen durchführen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 1982). Optimale Voraussetzungen sind ein enges C/N-Verhältnis der organischen Substanz (< 20), ein neutraler pH-Wert, eine gute Durchlüftung, ein Bodenwassergehalt von 50 % der max. WK und Bodentemperaturen zwischen 15 - 25 °C. Die Angaben über die Mengen, welche jährlich an organisch gebundenen Stickstoff mineralisiert werden, schwanken zwischen max. 3 % (DVWK, 1985) und max. 5 % (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 1998). SCHMALFUß (1958) bezeichnet die organische Substanz des Bodens als langsame, aber ständig fließende Stickstoffquelle.

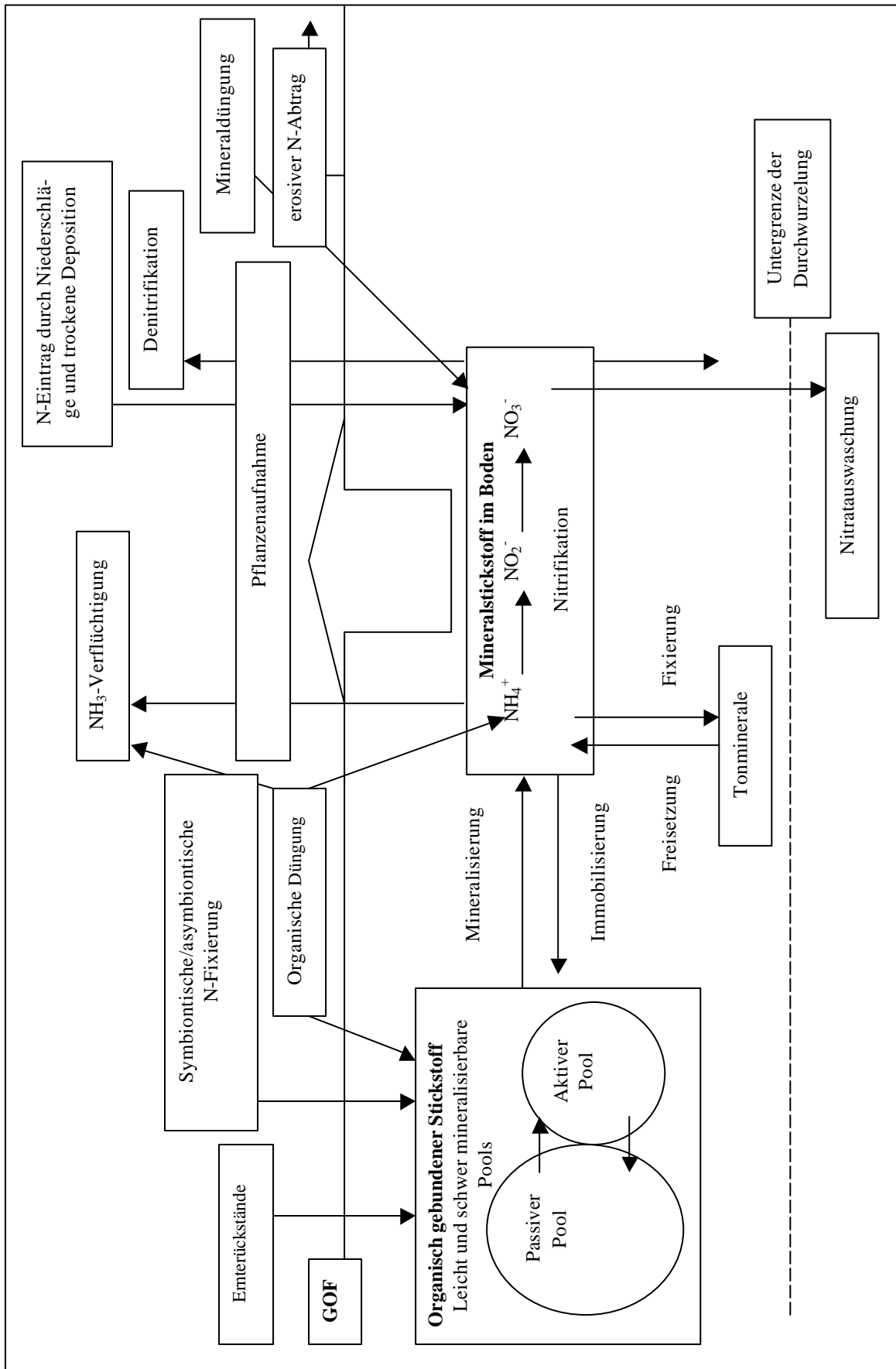


Abb. 1. Stickstoffkreislauf in der Agrarlandschaft (Quelle: SML, 1997; verändert).

Der 2. Schritt der Umsetzung ist die Nitrifikation (Abb. 1). Hierbei erfolgt die Oxidation von Ammonium über Nitrit zu Nitrat in 2 Stufen. Diese Reaktionen laufen optimal unter aeroben Bedingungen mit Beteiligung der Bakterien *Nitrosomonas* und *Nitrobacter* ab. Weitere fördernde Voraussetzungen sind Bodentemperaturen zwischen 25 – 35 °C, ein Bodenwassergehalt von 60 - 80% der max. WK und alkalische Bodenreaktionen (KUNTZE, 1983). Die Nitrifikation ist mit einer Erhöhung der Acidität des Bodens verbunden (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 1998). Weiterhin führt KUNTZE (1983) an, dass die Ammonifikation sehr langsam über Wochen bis Monate abläuft, wogegen die Nitrifikation unter optimalen Bedingungen in 10 - 15 Tagen ablaufen kann. Nach SCHEFFER, KUNTZE & BARTELS (1987) besteht eine Möglichkeit den Nitrataustrag durch den Einsatz von Nitrifikationshemmern, z.B. Didin (Dicyandiamid), ohne Nutzungseinschränkung zu senken. Diese Stoffe hemmen die biochemische Nitratbildung im Boden. Die hemmende Wirkung dauert je nach klimatischen Einflußgrößen unterschiedlich lange an.

Immobilisierung

Ein Prozess der Immobilisierung ist die Nitratatmung. Dabei erfolgt die Reduktion von Nitrat durch Mikroorganismen zu Ammonium. Durch den Einbau von Ammonium in mikrobielle Biomasse, geht diese Verbindung von der pflanzenverfügbaren anorganischen Form wieder in die organische Form über. Diese vorübergehende Immobilisierung bezeichnet RIEß (1993) als „biologische Stickstoffsperre“. Nach Absterben der Mikroorganismen ist wieder eine Mineralisation möglich. Eine Begünstigung der Immobilisierung erfolgt durch stickstoffarme organische Substanz mit einem weiten C/N-Verhältnis.

Ein weiterer Immobilisierungsprozess ist die mögliche Sorption von Ammonium an den Kationenaustauscherplätzen des Bodens. Das so fixierte Ammonium ist stabil gegenüber Umsetzungsprozessen und nur begrenzt pflanzenverfügbar (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 1982). Das fixierte Ammonium kann aus dem Ausgangsgestein, aus Düngermitteln und aus der Mineralisierung stammen. Das im Inneren von Silikaten eingeschlossene native NH_4 hat für die N-Dynamik im Boden und die Pflanzenernährung keine Bedeutung.

N-Zufuhr

Ein Eintrag von Stickstoff in den Boden kann durch Bindung von elementarem Luftstickstoff erfolgen. Verschiedene Bakterien und Algen des Bodens können elementaren Luftstickstoff in organische Verbindungen einbauen. Dieser Stickstoff wird dem organischen Stickstoffpool des Bodens zugeführt (KUNTZE 1983). Nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1982)

kann durch Niederschläge ein Eintrag von Stickstoff in Form von Stickoxiden der Atmosphäre erfolgen. Eine weitere Stickstoffzufuhr erhält der Boden durch Düngung mit organischen oder mineralischen Düngemitteln. Die Zufuhr richtet sich nach Kulturart und Bewirtschaftungsintensität. Der Ausnutzungsgrad des enthaltenen Stickstoffs ist abhängig von dem Ausbringungszeitpunkt, der Fruchtart, der Bodenart, der Art der Einarbeitung in den Boden sowie der Witterung während und nach der Ausbringung (RIEß, 1993). Organische Dünger enthalten je nach Herkunft unterschiedliche Mengen an organischen N-Verbindungen und Ammonium. Mineralische Dünger können Stickstoff in den Formen Nitrat, Ammonium oder in Form von Amiden. Auch über Ernterückstände kann eine N-Zufuhr erfolgen, wobei je nach Kulturart und Bewirtschaftung unterschiedliche Mengen an Ernterückständen vorliegen.

N-Verluste

Stickstoffverluste des Bodens können durch gasförmige Verflüchtigung in Form von Ammoniak oder elementarem Luftstickstoff, durch Pflanzenentzug, durch Auswaschung mit dem Sickerwasser oder durch Abschwemmung erfolgen. Gasförmige Verluste sind durch Ammoniak-Verflüchtigung oder mikrobielle Denitrifikation des Nitrats zu elementarem Stickstoff möglich. Die Ammoniak-Verflüchtigung wird durch die Bildung von Ammoniak aus Ammonium bei hohen pH-Werten, niedrigen Sorptionskapazitäten des Bodens, hohe Bodentemperaturen und hohe Ammoniumkonzentrationen begünstigt (DVWK, 1985). Bei im Boden vorherrschendem Sauerstoffmangel werden hierbei zum Abbau der organischen Substanz, anstelle von Sauerstoff, Nitrit und Nitrat als Oxidationsmittel verwendet. Diese Form der Stickstoffverluste wird neben Sauerstoffmangel, durch pH-Werte zwischen pH 7 - 8, Bodentemperaturen zwischen 15 – 35 °C, hohe Gehalte an Nitrat und hohe Mengen leicht zersetzbarer organischer Substanz gefördert. Sauerstoffmangel kann durch hohe Bodenfeuchte, Stau-nässe oder starke Verdichtung hervorgerufen werden. Weiterhin treten nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1998) Denitrifikationsverluste nach intensivem Regen oder Beregnung nach vorheriger Austrocknung auf.

Durch den Anbau von N-mehrenden und N-zehrenden Kulturpflanzen findet ein differenzierter N-Entzug aus dem Boden statt. Die N-Aufnahme der Kulturpflanzen wird durch zahlreiche Bewirtschaftungsmaßnahmen bestimmt (FRAHM, 1985).

Auf hängigem Gelände sind N-Verluste durch Abschwemmungen von stickstoffhaltigen Dünger- und Bodenpartikeln mit auf der Oberfläche abfließendem Wasser möglich. Diese Verluste sind jedoch im Vergleich zur Auswaschung sehr gering (DVWK, 1985). Nach

SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1998) sind N-Verluste durch Wasser- und Winderosion jedoch von Bedeutung. Dies wird mit dem hohen Gehalt der Oberböden an organisch gebundenem Stickstoff und dem damit verbundenem Verlust an potenziell aufnehmbarem Stickstoff begründet.

Die größten N-Verluste entstehen durch die Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser. Nach DVWK (1985) muss angesichts der flächenmäßigen Bedeutung der landwirtschaftlichen Bodennutzung und den damit verbundenen Eingriffen in den Stickstoffhaushalt des Bodens, die Landwirtschaft als nicht unbedeutender Verursacher der Nitratbelastung betrachtet werden.

1.2.2 Stickstoffhaushalt bei unterschiedlichen Intensitäten der Bodenbearbeitung

Es sind zahlreiche Vor- und Nachteile von konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung bekannt. Diese werden in ihrer Gesamtheit hier nicht betrachtet. An dieser Stelle erfolgt ein für die vorliegende Arbeit relevanter Überblick über die Forschungsergebnisse zum Stickstoffhaushalt bei unterschiedlichen Formen und Intensitäten der Bodenbearbeitung.

Die Bodenbearbeitung übernimmt eine wichtige Rolle hinsichtlich der Verfügbarkeit und des Transports von Wasser, Luft, Energie und Nährstoffen (KTBL, 1998).

Nach RIEß (1993) stellt sich je nach Boden- und Klimabedingungen, Vegetation und anthropogenen Eingriffen ein standortspezifischer, zeitlich variierender Nitratgehalt im Boden ein. Durch unterschiedliche Bearbeitungsintensitäten des Bodens kann der Nitratgehalt beeinflusst werden. Dabei führt stärkerer Bearbeitungseinfluss durch Belüftung zu einem verstärkten oxidativen Angriff der organischen Bodensubstanz. Dadurch wird mehr Stickstoff oxidativ abgebaut. Die entstehenden Umwandlungsprodukte können einem Austrag unterliegen (FACHVERBAND STICKSTOFFINDUSTRIE e.V., 1961; DVWK, 1985; HÜTSCH & MENGEL, 1989; CLAUPEIN & BAEUMER, 1990; HOFFMANN, 1995; SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 1998). Nach konventioneller Bodenbearbeitung mit Pflug weist der Boden bis in die gepflügte Tiefe (25 - 30 cm) ein erhöhtes Grobporenvolumen auf (APEL & FRANKEN, 1990). Der intensive Abbau der organischen Bodensubstanz kann nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1998) vermindert werden, wenn anstelle des Pfluges lockernde Geräte bei der Bodenbearbeitung eingesetzt werden.

Bei konventioneller Bodenbearbeitung mit dem Pflug wurde im Vergleich zu den anderen Varianten ein erhöhter N-Austrag in der Winterperiode festgestellt (DVWK, 1985; CLAUPEIN & BAEUMER, 1990). Diese Beobachtung ist sehr witterungsabhängig. Einen deutlich höheren N-Austrag nach herbstlicher Bearbeitung mit dem Pflug auf einem Lößboden ermittelten auch KOHL (1989) sowie KOHL & HARRACH (1991). Die Bodenbearbeitung besitzt dabei die Möglichkeit, über die Gestaltung des Saatbettes und den Erfolg der Bestandsgrünung auf die Entwicklung, das Wachstum der Kulturpflanze und deren Stickstoffaufnahme einzuwirken (CLAUPEIN & BAEUMER, 1990). Durch vorhandene stickstoffaufnahmefähige Pflanzen kann somit ein Austrag vermindert werden. Durch den Anbau von Zwischenfrüchten ist nach DVWK (1985) eine deutliche Verminderung der N-Auswaschung und der Grundwasserneubildungsrate möglich. Die N-Mengen, welche dem Boden durch Zwischenfrüchte zugeführt werden, müssen jedoch bei Frühjahrsdüngung berücksichtigt werden, da sonst ein zu großer N-Pool im Boden entsteht.

In den konservierenden Bodenbearbeitungssystemen verbleiben unterschiedliche Mengen an Reststoffen der Vorfrucht im und/ oder auf dem Boden. Bei Überschuss an Kohlenhydraten, z.B. durch eine Strohdüngung, wird für die mikrobielle Eiweißsynthese der mineralische Bodenstickstoff verwandt. Bei Mangel an bodenbürtigem Stickstoff kommt es dabei zur Hemmung der Mineralisation (FACHVERBAND STICKSTOFFINDUSTRIE e.V, 1961).

Ein Grundgedanke der konservierenden Bodenbearbeitung ist das Belassen von Mulchmaterial nahe bzw. auf der Bodenoberfläche. In den ersten fünf Jahren nach der Umstellung von konventioneller auf konservierende Bodenbearbeitung sind dabei nach CLAUPEIN & BAEUMER (1990), sowie KTBL (1998) die Austräge an Nitrat geringer, da eine Fixierung des Stickstoffs an das organische Material erfolgt. Durch reduzierte Bearbeitung wird dadurch der Vorrat an organisch gebundenem Stickstoff vergrößert. Entsprechend verringert sich das Angebot an Mineralstickstoff im Boden und die Auswaschungsgefahr. Eine verzögerte N-Aufnahme im Oberboden konnte STAHL (2002) bei konservierender Bodenbearbeitung auf einem Kippenstandort beobachten. Nach 3 Jahren Bewirtschaftungsumstellung konnte eine Einregulierung der N-Aufnahme festgestellt werden.

In konservierend bearbeiteten Böden sind aufgrund höherer Infiltrationsleistungen, geringerer Verdunstung und höherer Lagerungsdichten im Vergleich zur konventionellen Bodenbearbeitung höhere Wassergehalte möglich. Durch die höheren Wassergehalte bei konservierend bearbeiteten Böden können größere Denitrifikationsverluste auftreten. Weiterhin ist in unbearbeiteten und reduziert bearbeiteten Böden, durch die Verminderung der luftführenden Grob-

poren, mit höheren Denitrifikationsverlusten zu rechnen (CLAUPEIN & BAEUMER, 1990). Durch erhöhten Bodenwassergehalt bei reduzierter Bodenbearbeitung kann im Frühjahr eine langsamere Erwärmung erfolgen, welche mit verzögerten Abbauprozessen der organischen Substanz einhergeht (KOHL, 1989). Deshalb wird in dieser Phase eine anfänglich erhöhte Stickstoffdüngung empfohlen (CLAUPEIN & BAEUMER, 1990; HOFFMANN, 1995). Im Jahresverlauf ist jedoch nach HOFFMANN (1995) keine geringere oder verzögerte N-Freisetzung bei reduzierter Bodenbearbeitung zu verzeichnen. Die höchsten Mineralisationsraten werden zur Zeit des höchsten Pflanzenbedarfs im Juli erreicht. Nach FREDE & DABBERT (1999) schwankt die Bodentemperatur bei reduzierter Bearbeitung langsamer, wodurch abrupte Wechsel in der Mineralisation vermieden werden.

Von entscheidender Bedeutung für den N-Umsatz in konservierenden Bodenbearbeitungssystemen ist die Zeitdauer, während auf die wendende Bodenbearbeitung verzichtet wird. Nach ca. 10 - 15 Jahren konnte bei Untersuchungen von CLAUPEIN & BAEUMER (1990) in Bezug auf den Nitrataustrag eine Anpassung der Varianten Lockerbodenwirtschaft (Pflug) und Festboden-Mulchwirtschaft verzeichnet werden. Es stellt sich ein Fließgleichgewicht zwischen N-Immobilisierung und Mineralisation ein. Bei extremen Ausgangsbedingungen sind nach KÖRSCHENS (1990) mehr als 40 Jahre nach einer Umstellung der Bewirtschaftung bis zum Erreichen eines Fließgleichgewichtes notwendig.

Nach Erreichen des Fließgleichgewichtes kann sich organisch gebundener Stickstoff bei reduziert bearbeiteten Systemen anreichern. Niedrigere Mineralisationsraten werden hierbei durch einen größeren Vorrat an organisch gebundenem Stickstoff ausgeglichen (CLAUPEIN & BAEUMER, 1990). Nach längeren Versuchslaufzeiten kann es zum stetigen Anstieg mikrobieller Populationen im Oberboden der Direktsaat und damit zur Herstellung eines Immobilisierungspotenzials kommen. Dies ermittelten HÜTSCH & MENGEL (1989) in ihren Untersuchungen nach 10 Jahren Bewirtschaftungsumstellung.

Bei einer Minimalbodenbearbeitung erfolgt nach DVWK (1985) eine biologische Fixierung von auswaschungsgefährdetem Stickstoff. Ein schwächerer Bewuchs kann bei dieser Bearbeitungsvariante den Landwirt dazu verleiten, die N-Düngegaben zu erhöhen. Nach CLAUPEIN & BAEUMER (1990) kann auch bei gleichen N-Angebot die N-Aufnahme in den Feldfrüchten der konservierenden Variante geringer sein. Dies wird mit Mängeln in der Bestandesbeurteilung, verzögerter Bodenerwärmung und mangelnder Kontrolle der Verunkrautung begründet.

Durch Mulchsaat erfolgt eine Begünstigung der Lebensbedingungen der Makrofauna (CLAUPEIN & BAEUMER, 1990; SCHMIDT et al., 1996 b). Dadurch wird die Entstehung von bis an die Oberfläche reichenden Makroporen gefördert. Die Aktivität von tiefgrabenden Regenwürmern ist für die Anlage kontinuierlicher Bioporen von entscheidender Bedeutung (RICHTER & TEBRÜGGE, 1997). Durch konservierende Bodenbearbeitung werden günstige Lebensbedingungen für diese tiefgrabende Regenwürmer geschaffen (KRÜCK et al., 2001). Dies konnte durch Untersuchungen von UHLIG (2001) auf dem Schlag Lüttewitz nachgewiesen werden.

Der Makroporenfluß ist für den Nitrataustrag nur entscheidend, wenn ein Starkregen einsetzt und eine Übersättigung des Bodens erreicht ist oder schnell erreicht wird. Dadurch kann es zu einem Austrag von nitrathaltiger Bodenlösung der Matrix kommen (CLAUPEIN & BAEUMER, 1990). Ansonsten kann jedoch davon ausgegangen werden, dass das Wasser welches durch die Makroporen versickert, weniger Nitrat aus der Bodenmatrix aufnimmt. Nach KTBL (1998) ist ein Austragsrisiko durch Makroporenfluß zeitlich eng begrenzt. Nach KOHL (1989) fließt in Makroporen ein erheblicher Anteil des Niederschlagswassers an der Bodenmatrix vorbei, ohne dass es zu Diffusionsprozessen kommt. Durch diesen „bypass-effect“ wird in den Matrix- und Mikrostrukturen vorhandenes Nitrat praktisch konserviert. Dadurch wird nach BEISECKER (1994) die Auswaschung verringert und der Pflanzennährstoff bleibt länger verfügbar. Durch konventionelle Bodenbearbeitung werden Makroporen zerstört. HÜTSCH & MENGEL (1989) bestätigen, dass durch die Bodenwendung das natürliche Gefüge gestört wird, und somit Sickerwasser länger in der Ackerkrume bleibt. Dadurch kann mehr Nitrat aus feineren Poren herausgelöst werden..

Nach Ausführungen von SCHMIDT et al. (1996 b) ist gerade in den Ackerbauregionen des Mittelsächsischen Lößhügellandes durch konservierende Bodenbearbeitung eine deutliche Verminderung des Oberflächenabflusses und der Erosion gegeben. Dies konnte ebenfalls durch Untersuchungen von UHLIG (2001) auf zwei sächsischen Standorten bestätigt werden, wobei der Schlag Lüttewitz einen Untersuchungsstandort bildete.

Nach Ausführungen von BEISECKER (1994) und RICHTER (1995) weisen die verschiedenen Bodenbearbeitungssysteme eine deutlich unterschiedliche N-Dynamik im Jahresverlauf und eine unterschiedliche N-Verteilung im Boden auf. Jedoch ist kein Bodenbearbeitungssystem hinsichtlich der N-Auswaschung ungünstiger zu bewerten. Im Vergleich zur Variante Pflug fanden HÜTSCH & MENGEL (1989) im Unterboden der Direktsaatvariante deutlich

niedrigere Nmin-Gehalte. GROFFMANN et al. (1987) konnten eine Anreicherung von organischem Kohlenstoff und Stickstoff in den oberen 5 cm Boden bei reduziert bearbeiteten Varianten ermitteln. Nach Ausführungen von DORAN (1984) sind die Gehalte unter dieser Tiefe innerhalb der Krume jedoch geringer als die Gehalte der Variante Pflug.

1.2.3 Rechtlicher Rahmen

Nitrat selbst besitzt eine geringe Toxizität, kann jedoch im Wasser, in Lebensmitteln oder im menschlichen Körper in Nitrit umgewandelt werden. Nitrit kann bei Säuglingen in den ersten Lebensmonaten Methämoglobinämie hervorrufen. Weiterhin ist eine Reaktion mit sekundären Aminen und Amiden im Verdauungstrakt zu kanzerogenen Nitrosaminen bzw. Nitrosamiden möglich (RIEß zit. nach PREUSSMANN, 1982). Im Tierversuch wurde eine krebserregende Wirkung vieler Nitrosamine nachgewiesen. Sie stehen im Verdacht auch beim Mensch Krebs erzeugen zu können. In jüngeren Arbeiten von LEIFERT & GOLDEN (2000) werden verschiedene physiologische Studien ausgewertet. Darauf aufbauend wird die karzinogene Wirkung von Nitrat in Frage gestellt und auf die nutzbringende physiologische Rolle von definierten Nitratmengen in der Nahrung zum Schutz des Magen-Darm-Bereiches gegen Krankheitserreger verwiesen. Die bedeutendsten Quellen für die menschliche Aufnahme von Nitrat über die Nahrung sind Obst und Gemüse, Trinkwasser und einige haltbar gemachte Fleischprodukte.

Durch die EG- Nitratrichtlinie (1991) werden die Mitgliedstaaten der EU verpflichtet, für die Landwirtschaft „Regeln der guten fachlichen Praxis“ sowie Aktionsprogramme aufzustellen. Die EG-Trinkwasser-Richtlinie (1986) legt u.a. die Qualität des Trinkwassers fest. Die zulässige Höchstkonzentration für Nitrat im Trinkwasser beträgt 50 mg/l, wobei der Richtwert bei 25 mg/l liegt. Durch das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) (1986) werden in der BRD Bewirtschaftungsregeln für Wasserschutzgebiete festgelegt. In Sachsen wird dieses Bundesgesetz durch die „Verordnung über die Schutzbestimmungen und Ausgleichsleistungen für erhöhte Anforderungen der Land- und Forstwirtschaft in Wasserschutzgebieten“ (SächsSchAVO) von 1994 präzisiert.

Nach dem Düngemittelgesetz (DMG) von 1977 (Änderung 1994) sind neben dem Bedarf der Pflanzen und dem Nachlieferungsvermögen des Bodens auch die Standort- und Anbaubedingungen bei Düngungsmaßnahmen zu berücksichtigen. Durch die Düngeverordnung von 1996 (Änderung 1997) sind einheitliche Regeln der „guten fachlichen Praxis“ (gFP) festgelegt. Auf

der Länderebene sind dabei die jeweiligen Verwaltungsvorschriften zur Düngeverordnung zu beachten (SML, 1997). Im Freistaat Sachsen erfolgt die Düngungsberatung auf Basis des Beratungsmodells BEFU. Dieses Modell dient in Sachsen für die Düngungsbemessung im Agrarumweltprogramm „Umweltgerechte Landwirtschaft“.

Um die gesellschaftlichen Erwartungen an eine umweltschonende Landwirtschaft zu erfüllen, gewähren die EU, der Bund und die Länder Beihilfen und Ausgleichsleistungen sowie Entgelte für festgelegte Bewirtschaftungsmaßnahmen. Seit 1993 läuft in Sachsen das Programm „Umweltgerechte Landwirtschaft“. Ein Schwerpunkt des Programms bildet das Teilprogramm „Umweltgerechter Ackerbau“. Im Rahmen dieses Förderprogramms werden Zuschüsse u.a. für Anbau von Zwischenfrüchten und Mulchsaat gewährt. Durch das Bundesbodenschutzgesetz § 17 Abs. (2) werden Grundsätze für die „gute fachliche Praxis“ (gfP) zur landwirtschaftlichen Bodennutzung formuliert. Durch die Grundsätze der gfP wird u.a. angestrebt, die Bodenstruktur und den standorttypischen Humusgehalt des Bodens zu erhalten oder zu verbessern. Nach SOMMER (1999) stellt konservierende Bodenbearbeitung eine Antwort auf die formulierten Herausforderungen dar. Ziel dieser Grundsätze ist die Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Produktion.

Die rechtlichen Regelungen greifen nach FREDE & DABBERT (1998) einerseits direkt durch Gebote und Verbote, andererseits indirekt durch Qualitätsziele, Richtwerte und Grenzwerte für Wasserinhaltsstoffe in die landwirtschaftliche Praxis ein. Ein Beispiel jüngerer Zeit ist ein Pilotprojekt der Kommunalen Wasserwerke Leipzig. Diese regeln über einen Vertrag mit einem landwirtschaftlichen Großbetrieb die zulässige anwendbare Höchstmenge an stickstoffhaltigen Düngemitteln im Einzugsgebiet eines Großwasserwerkes. Somit wird eine Belastung des Rohwassers im Vorfeld verhindert (LVZ, 2002). Nach HOFREITHER (1996) resultiert die Wirksamkeit gesetzlicher Regelungen jedoch in jeder Epoche, bei gegebener Kontrollintensität und Strafhöhe, aus der Übereinstimmung dieser Regelungen mit akzeptierten kollektiven Moral- und Wertvorstellungen.

2 Problemstellung

2.1 Einordnung der Untersuchung in ein laufendes Projekt der LfL

Aus einem laufenden Projekt des Fachbereichs 4 (FB 4) der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) entstand die Anregung zu dieser Forschungsarbeit. Innerhalb des BMBF-Projektes „Entwicklung von dauerhaft umweltgerechten Landbewirtschaftungsverfahren im Sächsischen Einzugsgebiet der Elbe“ bearbeitet der FB 4 das Teilthema „Begleitende Untersuchungen zur praktischen Anwendung und Verbreitung von konservierender Bodenbearbeitung, Zwischenfruchtanbau sowie Mulchsaat in den Ackerbaugebieten Sachsens zur Minderung der Wassererosion und Nährstoffaustrag im Elbeeinzugsgebiet“.

Im Hinblick auf die Vor- und Nachteile der Bodenbearbeitungsverfahren war die Frage nach Unterschieden im Nitrataustrag von besonderem Interesse. Mit den Untersuchungen im Rahmen der Diplomarbeit bestand die Möglichkeit in dem formulierten Themenkomplex zahlreiche unterschiedliche Methoden zur Anwendung zu bringen.

Die Untersuchung einer räumlich-zeitlichen Differenzierung energetisch-stofflicher Strukturen und Prozesse in der Landschaft ist nach NEUMEISTER (1999) ein ureigenes Gebiet der geographischen Forschung. Die Verbindung der Zeitparameter von 3 Untersuchungsjahren und der Raumparameter mittels digitaler Reliefanalyse ist elementarer Bestandteil der vorliegenden Arbeit.

2.2 Zielsetzung des Untersuchungsprogramms

Ziel der Arbeit ist die Erfassung und Beurteilung von Unterschieden im Stickstoffhaushalt und dem sickerwassergebundenen Nitrataustrag in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitungsintensität. Die Bewertung erfolgt für ein festgelegtes Untersuchungsgebiet mit seinen spezifischen Ausmaßen, Bodeneigenschaften und Oberflächenverhältnissen. Hierbei werden die wesentlichen Geofaktoren des Untersuchungsschlages betrachtet. Ein verringerter Austrag aus dem Boden ist im Hinblick auf die mögliche Gesundheitsgefährdung von Nitrit, die ökologischen Folgen erhöhter Nitratgehalte in aquatischen Ökosystemen und die ökonomischen Verluste für den Landwirt von Interesse.

Innerhalb dieses Themenkomplexes wurden folgende Fragestellungen formuliert:

- Welche Unterschiede im N-Haushalt treten bei den betrachteten Formen der Bodenbearbeitung im spezifischen Untersuchungsgebiet auf?
- Welche Veränderungen entstehen im Bodenwasserhaushalt durch unterschiedliche Bewirtschaftungssysteme?
- In welchen Größenordnungen liegen die Unterschiede im Nitrataustrag zwischen den Bodenbearbeitungssystemen?
- Welche Werte erreichen das C/N – Verhältnis und der Humusgehalt auf den unterschiedlichen bearbeiteten Flächen im Raum?
- Welchen Einfluss haben die Oberflächeneigenschaften des Schlages auf die untersuchten Parameter und ist die Ausweisung von potenziellen Verhaltenseinheiten möglich?
- Kann eine Ableitung für ein Bewirtschaftungskonzept getroffen werden und welche Relevanz haben diese Ergebnisse bei der Umsetzung der konservierenden Bodenbearbeitungssysteme in der Praxis?

3 Charakterisierung des Untersuchungsgebietes

3.1 Geographische Lage

Lage in Sachsen

In der Abb. 2 ist die Lage des Untersuchungsschlages in Sachsen dargestellt. Der Untersuchungsschlag befindet sich im Mittelsächsischen Lößhügelland. Die Fläche ist der Subregion Lommatzcher Pflege zuzuordnen. Das Versuchsfeld befindet sich ca. 4 km nordwestlich von der Autobahnabfahrt Döbeln Ost der A14 Leipzig-Dresden. Es wird im Westen und Süden von Landstraßen sowie im Norden durch einen Feldweg begrenzt.

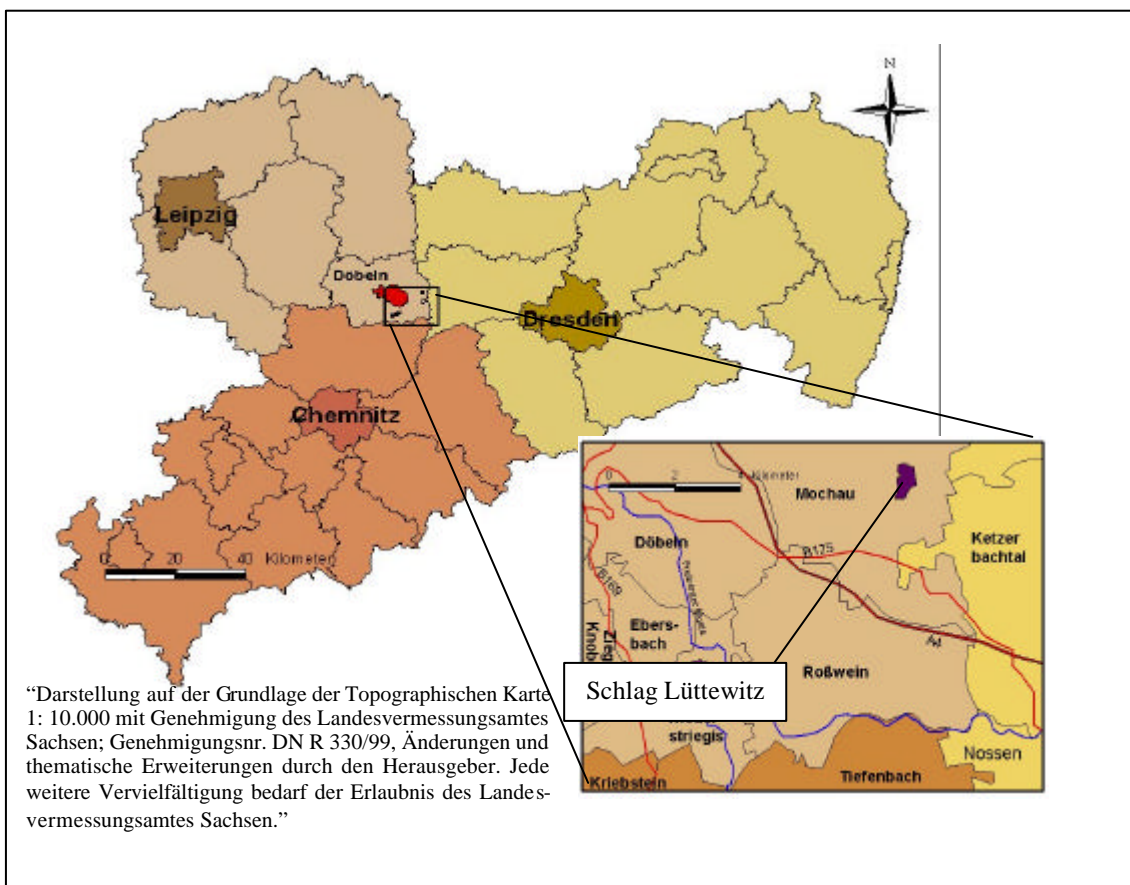


Abb. 2. Lage des Untersuchungsschlages in Sachsen (Quelle: LfL, verändert).

Landschaftsraum

Das Mittelsächsische Lößhügelland ist nach HAASE (1995) ein besonders charakteristischer Naturraum der Sächsischen Lößgebilde. Oberflächenbestimmend sind die Lößsedimente der Weichsel-Kaltzeit. Es ist ein durch Flachhänge und Platten gekennzeichnetes Hügelland, welches in der Nachbarschaft von Flusstälern recht reliefstark, aber in den Bereichen der Wasserscheiden eher reliefsschwach ist. In diesen Bereichen lagert eine ältere Bodenabfolge unter weichselzeitlichem Löß. Aus dem daraus entstandenen Lößlehm haben sich vielerorts Fahler-

den entwickelt, die an den der Abtragung stärker ausgesetzten Hangabschnitten in Parabrauerden übergehen (vgl. Kap. 3.5).

Eine ca. 30 – 50 m mächtige Lößbrandstufe bildet nach HAASE (1995) die Grenze der mächtigen, weichselzeitlichen Lösses des Mittelsächsischen Lößhügellandes im Süden zur der nur geringmächtigen sandig-kiesigen Lößdecke, dem Kryoturbatlöß, auf Moränenplatten und Porphyrhügeln im Norden. Die Lößbrandstufe lehnt sich vielfach an ältere Reliefformtypen an. Aus der Elbtalerweiterung im Osten greifen tief eingeschnittene Kerbtälchen bis zu 4 km in das Hügelland und schaffen damit stark in Riedel, Sporne und Hangstufen aufgelöste Plateaurandbereiche. Durch die Fruchtbarkeit der mächtigen Lösses wurde in diesem Gebiet bereits seit dem Neolithikum Ackerbau betrieben. HERZ (1960, S. 216) beschrieb das Gebiet mit „beinahe bis in den letzten Winkel ackerbaulich genutzt“. Der Begriff Lommatzscher Pflege für dieses Kerngebiet wird bereits seit dem 16. Jh. gebraucht.

Das Hügelland wird durch 20 - 50 m eingesenkte Dellensysteme, zahlreiche Tilken und an den Plateaurändern auch Hangkerben in zahlreiche Konkav-Konvex-Hänge sowie Hang- und Flachkuppen zergliedert. In diesem Relief entwickelten sich weit verzweigte natürliche Abtragsbahnen, die mit Dellenfüllungen bis zu mehreren Metern Mächtigkeit die hohe Erosionsdisposition der Lösses seit ihrer Inkulturnahme nachweisen (HAASE, 1995). Nach KRAMER (1989) bestimmt die Lößdecke die Gebietshomogenität. Dabei wirkten Reliefeigenschaften in starkem Maße limitierend auf die Größe und Kontur der Geländeschläge.

3.2 Lage im Makrorelief

In der Abb. 3 ist die Lage des Untersuchungsschlages im Makrorelief dargestellt. Insgesamt kann im Makrorelief des Untersuchungsschlages ein Höhenunterschied von ca. 35 m festgestellt werden. Im Süden werden Höhenbereiche von 270 m ü. NN sichtbar. Im Norden des Schlages ist eine Senke ausgebildet, welche von Ost nach West mit einem Höhenunterschied von ca. 5 m abfällt. Dieser Bereich wird in Erläuterungen im Text als nördliche Senke bezeichnet. Im Norden sind Höhenbereiche von ca. 280 m ü. NN erkennbar. Der Südteil des Schlages ist nach Südosten geneigt. Die Oberfläche fällt hier von 270 m im Norden auf 245 m im Südosten ab. Im Südteil des Schlages ist eine zweite größere Senke ausgebildet, welche nach Osten ausstreicht. Dieser Bereich wird in Erläuterungen im Text als südliche Senke bezeichnet. Die Grundwasserflurabstände sind in dem Gebiet im Allgemeinen größer als 6 m

(HÄRTEL, 1931). Im südlichen Senkenbereich konnte während der Probenahme ein Grundwasserflurabstand von ca. 5 dm ermittelt werden. In diesem Bereich wurde im Jahr 2000 eine Drainagemaßnahme durchgeführt (Abb. 3).

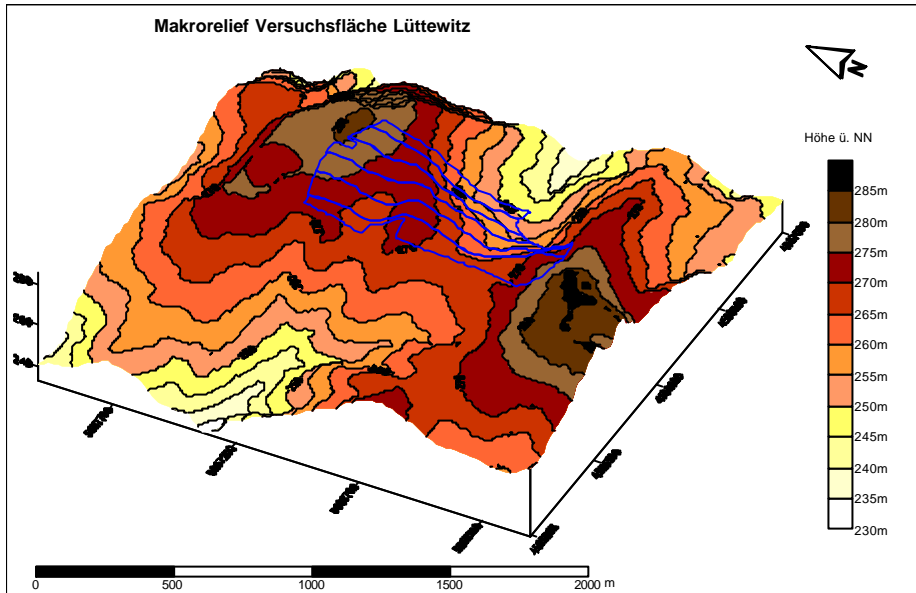


Abb.3. Lage der Untersuchungsfläche im Makrorelief.

Das Makrorelief ist von zahlreichen Mikrostrukturen durchzogen. Diese Strukturen wurden erst durch die digitale Reliefanalyse erkenntlich und bewertbar (vgl. Kap. 5.4).

Die Lage des Untersuchungsschlages im Einzugsgebiet des Dreißiger Wassers ist in der Abb. 4 ist dargestellt. Durch die Kennzeichnung der Lage im Makrorelief und der Darstellung der Lage im Einzugsgebiet des Dreißiger Wassers können oberirdische Zuflüsse auf das Untersuchungsfeld erfasst werden. Weiterhin wird der Abfluss in die Vorfluter erkennbar. Das Untersuchungsfeld Lüttewitz besitzt eine N-S-Neigung, sowie eine W-O-Neigung. Diesen Neigungen folgen die natürlichen lokalen Wasserscheiden. Der Untersuchungsschlag wird im Westen und im Süden von Landstraßen begrenzt, die als anthropogene Wasserscheiden wirken (Abb. 4).

Der Hauptteil des Untersuchungsfeldes, ca. 80 % entwässert oberirdisch nach Südosten, in einen Vorfluter des Dreißiger Wassers. Dieser Vorfluter entspringt in Höhe der Ortslage Markritz. Nach einer Lauflänge von ca. 5 km mündet dieser Vorfluter in das Dreißiger Wasser in Höhe der Ortschaft Lossen. Das Dreißiger Wasser verbindet sich in der Gemarkung Leuben-Schleinitz mit den Vorflutern Churschützer Bach, Stahnaer Bach und Ketzlerbach. Die Fließrichtung ist Nordost in Richtung Lommatzsch. Der Ketzlerbach mündet in Zehren in die

Elbe. Das lokale Einzugsgebiet des Schlags fällt somit in das Elbeeinzugsgebiet. Dadurch ist die Relevanz der vorliegenden Untersuchung auf lokaler Ebene erkennbar.

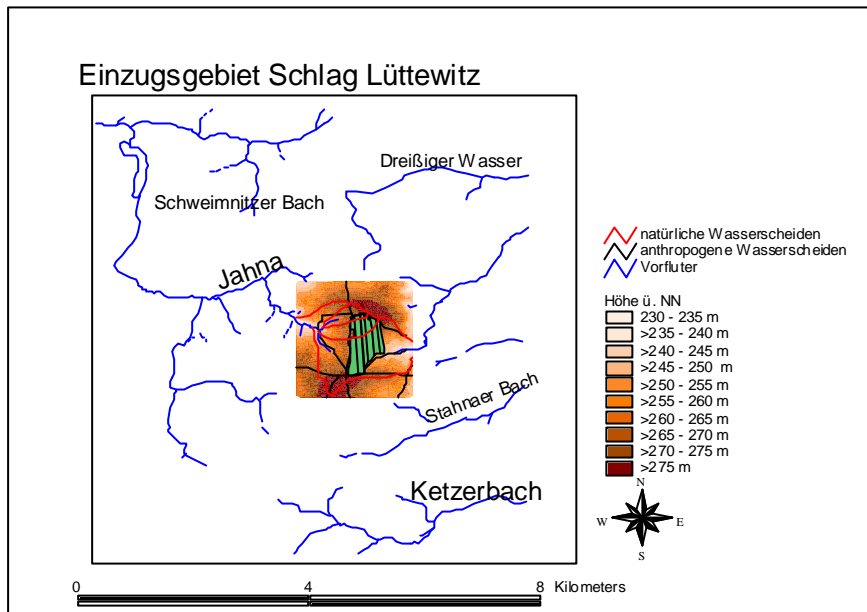


Abb.4. Einzugsgebiet Schlag Lüttewitz (Grundlage TK 25 Blatt 4845 (N) Lommatzsch, 1995).

Wie die unterirdischen Wasserscheiden aussehen, kann auch unter Einbezug der geologischen Karte nicht beurteilt werden.

3.3 Geologische Verhältnisse

In der Abb. 5 sind die geologischen Verhältnisse im Bereich des Untersuchungsschlages erkennbar. Lößlehm bildet fast flächendeckend das Ausgangssubstrat für die Bodenbildung innerhalb des Untersuchungsschlages. Nur im südöstlichen Teil der Fläche sind nach der geologischen Karte Bereiche mit Anlagerungen kleinerer Täler ausgewiesen. Bei diesen Ablagerungen handelt es sich um holozäne Auensedimente. Das schluffreiche Sediment Löß wurde während der quartären Vereisung aus den periglazialen, vegetationsarmen Schmelzwasser- und Frostschuttablagerungen ausgeweht. Die Fruchtbarkeit des Lösses ist durch die homogene Korngrößenzusammensetzung und der daraus resultierenden Porosität, durch das Wasserhaltevermögen und die Durchlüftung bestimmt. Unter den humiden Klimabedingungen der Nacheiszeit wurden die Carbonate des Lösses bis zu einer Tiefe von 1,5 m ausgewaschen. Im Anschluss an diese Entkalkung wurde der gelbe Löß durch Eisenoxid- und Tonbildung in gelbbraunen Lößlehm umgewandelt (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 1998).

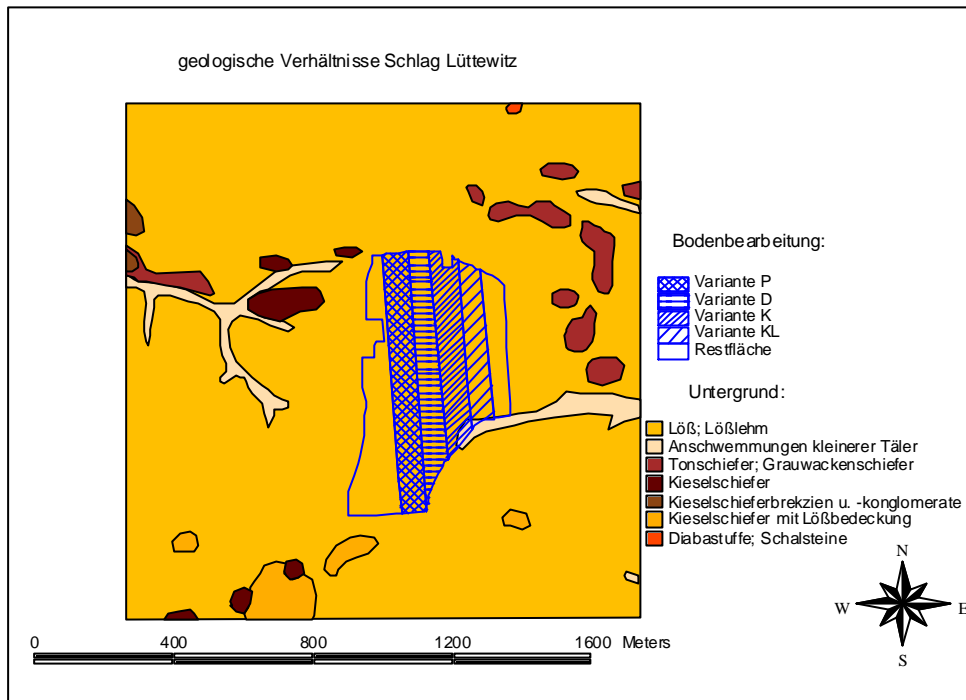


Abb. 5. Geologische Verhältnisse Schlag Lüttewitz (Grundlage: Geologische Karte von Sachsen 1:25000, Nr. 47 Blatt Lommatzsch, II. Auflage, Leipzig 1931).

Nach HÄRTEL (1931) ist in der Region des Mittelsächsischen Lößhügellandes im Allgemeinen von Entkalkungstiefen zwischen 1,5 m – 2 m unter GOF auszugehen. Nordöstlich des Schlages sind nach der geologischen Karte vereinzelte Vorkommen von Tonschiefer und Grauwackenschiefer ausgewiesen. Nach HÄRTEL (1931) finden sich dort, wo die Lößauflage durch Erosion stark ausgedünnt ist, ältere Gesteine und deren Verwitterungsprodukte an der Bodenoberfläche. Auch innerhalb des Schlages liegen im Kuppenbereich des nach Süden fallenden Hanges punktuell Bruchstücke von Grauwackenschiefer vor. In diesem erodierten Bereichen ist nach der Bodenkarte von TEIWES (1997) als Bodentyp ein Ranker ausgewiesen.

3.4 Klimatische Verhältnisse

Das Gebiet des Mittelsächsischen Lößhügellandes weist nach HAASE (1995) Jahresmittel der Temperatur von 8,3 - 8,8 °C und eine durchschnittliche Niederschlagssumme von 600 mm auf. Für das Lößhügelland ist die im gesamten Lößgefilde gegebene Windoffenheit ein charakteristisches Klimamerkmal. Im Winter kann es hier zu starker Deflation von Bodenteilchen kommen, welche durch ihre Schlifffwirkung auflaufende Saaten beeinträchtigen können. Der Witterungsverlauf der Jahre 1999 bis 2001 wurde durch die Auswertung der entsprechenden Klimaparameter gekennzeichnet.

3.5 Pedologische Verhältnisse

In der Abb. 6 sind die pedologischen Verhältnisse des Untersuchungsschlages dargestellt. Es ist erkennbar, dass auf dem Untersuchungsschlag Ranker, Kolluvien und Parabraunerden als Bodentypen nach TEIWES (1997) auftreten. Die Parabraunerden sind als Variation Braunerde-Parabraunerde, mittlere und flache Parabraunerde vertreten. Dabei bezeichnet die Kennzeichnung flach und mittel die Untergrenze der Entwicklung des Al-Horizontes. Dieser liegt bei den flachen Parabraunerden bei 3 - 3,5 dm u. GOF und bei den mittleren Parabraunerden bei 4,5 - 7 dm u. GOF. Die flachen Parabraunerden sind gekennzeichnet durch verkürzte Profile aufgrund von Erosion. Diese Bereiche befinden sich am Mittelhang des nach Süden geneigten Haupthanges. Die Tongehaltsdifferenz zwischen dem Al-Horizont und Bt-Horizont ist bei den vorkommenden Parabraunerden gering. In den Zwischensenken sind teilweise Stau-nässemerkmale ausgeprägt. Im dem Bereich der flachen Parabraunerden fehlt nach TEIWES (1997) häufig der komplette Al-Horizont.

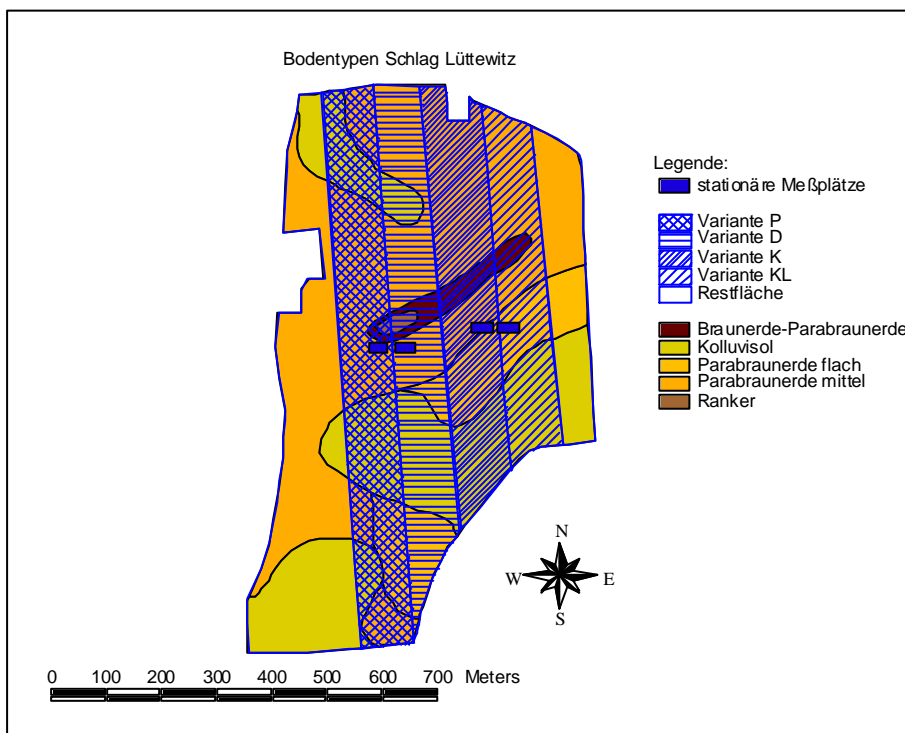


Abb. 6. Pedologische Verhältnisse Schlag Lüttewitz (Grundlage Bodenkarte nach TEIWES, 1997).

Der Bodentyp Ranker (Abb. 6) befindet sich im Kuppenbereich des nach Süden einfallenden Haupthanges. Die Untergrenze des feinbodenreichen Lockergesteins beträgt hier ca. 2 - 4 dm u. GOF. Dieser Bodentyp weist eine geringe nFKWe von 100 - 140 mm auf. Die Deckschicht aus Lößlehm ist in diesem Bereich größtenteils erodiert. In den Bereichen größerer Löß-

lehmbedeckung sind Braunerde-Parabraunerden ausgebildet. Diese Zone erstreckt sich in einem ebenen Bereich in der Mitte des Schlages von West nach Nordost.

In den größeren Senkenbereichen und Unterhangbereichen werden ehemalige Parabraunerden von Solummaterial überdeckt. Bei Erosion werden durch Wasser abgetragene Bodenteilchen am Hangfuß oder in Senken als Kolluvium abgelagert und überdecken häufig vorhandene Bodenprofile. Als umgelagerte Ackerböden sind sie meist mit Nährstoffen angereichert. Es sind relativ junge Sedimente, welche durch Ablagerung entstanden, nachdem die Böden der Hänge in Ackerkultur genommen wurden (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 1998). Durch das verlagerte humose Material weisen diese Böden eine hohe nFKWe von 260 – 280 mm auf. In den Senkenbereichen sind Staunässemerkmale deutlich ausgeprägt. Für die gesamte Untersuchungsfläche wurde nach TEIWES (1997) eine Carbonatfreiheit bis mindestens 10 dm u. GOF ermittelt (Abb. 6).

Die Untersuchungsfläche wurde nach der Reichsbodenschätzung mit einer Bodenzahl von durchschnittlich 75 bewertet. Aus der Abb. 6 werden ebenfalls die Anlage der Großparzellen und die stationären Messplätze erkennbar. Die stationären Messplätze befanden sich innerhalb verschiedener Bodeneinheiten.

3.6 Bewirtschaftungsdaten des Standortes

3.6.1 Bearbeitungsvarianten

Aus arbeitswirtschaftlichen und ackerbaulichen Gründen werden gegenwärtig neue Wege der Reduzierung des Bearbeitungsaufwandes gesucht (ESTLER & KNITTEL, 1996). Durch das Bundesbodenschutzgesetz § 17 Abs. (2) werden Grundsätze für die „gute fachliche Praxis“ (gfP) zur landwirtschaftlichen Bodennutzung formuliert. Zur Realisierung dieser Grundsätze bietet die konservierende Bodenbearbeitung Lösungsansätze an.

Nach ESTLER & KNITTEL (1996) wurde angepasst an die unterschiedlichen Zielvorstellungen eine Vielzahl von Kombinationsgeräten für die Bodenbearbeitung und Saat entwickelt und zahlreiche Begriffe für die jeweiligen Verfahren geprägt. Diese Verfahren werden als Minimal-Bestelltechnik, reduzierte Bodenbearbeitung, Lockerboden- oder Festbodenwirtschaft etc. bezeichnet. In der vorliegenden Arbeit wird die Untergliederung nach KTBL

(1993) verwendet. Demnach werden 3 Bodenbearbeitungskonzepte nach ihrer Art, Intensität und Häufigkeit der mechanischen Eingriffe in das Bodengefüge unterschieden: die konventionelle Bodenbearbeitung mit Pflug, die konservierende Bodenbearbeitung mit dem Einsatz nichtwendender Bodenbearbeitungsgeräte sowie die Direktsaat ohne Bodenbearbeitung.

Bei der Bodenbearbeitung mit dem Pflug wird eine Lockerung und Wendung des Bodens bis auf Krumentiefe durchgeführt. Dabei werden organische Reststoffe und Unkraut in den Boden eingearbeitet. Diese Bodenbearbeitung hinterlässt eine von Reststoffen freie Ackeroberfläche als Voraussetzung für die störungsfreie Funktion herkömmlicher Sätechnik. Diese Variante wird im Text als Variante P bezeichnet.

Die konservierende Bodenbearbeitung beschreibt eine Bearbeitung ohne Pflugeinsatz. Die Bearbeitungsintensität dieses Verfahrens liegt zwischen der Bearbeitung mit Pflug und der Direktsaat. Das Konzept konservierende Bodenbearbeitung beruht auf zwei Grundgedanken. Einmal wird die übliche Intensität der Primärbodenbearbeitung nach Art, Häufigkeit und Tiefe des mechanischen Eingriffs reduziert. Durch diese nichtwendende Bodenbearbeitung und die längere Bodenruhe wird ein stabileres, tragfähigeres Bodengefüge geschaffen. Ein zweiter Grundgedanke ist das Belassen von Pflanzenreststoffen der Vor- und/oder Zwischenfrucht nahe oder auf der Bodenoberfläche. Durch diese Bodenbedeckung mittels Mulchmaterial wird ein vorbeugender Schutz gegen Verschlammung und Bodenabtrag erreicht.

In der Variante Konservierend fand auf dem Untersuchungsschlag eine jährliche Bodenbearbeitung mit dem Grubber bis in 10 cm Tiefe statt. Diese Variante wird im Text oder in Abbildungen als Variante K bezeichnet. In der Variante Konservierend Locker fand eine jährliche Bodenbearbeitung mit dem Grubber bis in 20 cm Tiefe statt. In der Fruchtfolge zu Zuckerrüben wurde auf dieser Parzelle eine Unterbodenlockerung in 40 cm mittels Tiefenlockerer durchgeführt. Diese Variante wird im Text oder in den Abbildungen als Variante KL bezeichnet.

Die Direktsaat ist ein Bestellverfahren ohne jegliche Bodenbearbeitung seit der Ernte der vorangegangenen Hauptfrucht. In der Variante Direktsaat erfolgte die Aussaat mit einer Scheibenscharsähmaschine, welche eine minimale Bodenbewegung bewirkt. In den Erläuterungen und Abbildungen wird diese Variante als Variante D gekennzeichnet.

In den Systemen konventionelle und konservierende Bodenbearbeitung besteht die Möglichkeit alle Arbeitsgänge getrennt durchzuführen, Saatbettbereitung und Saat zu kombinieren

oder auch sämtliche Arbeitsgänge für die Grundbodenbearbeitung, Saatbettbereitung und Saat zusammzufassen (ESTLER & KNITTEL, 1996). Eine Erläuterung der Arbeitsgänge Stoppelbearbeitung, Grundbodenbearbeitung und Saatbettbereitung kann u.a. FRAHM (1985) sowie ESTLER & KNITTEL (1996) entnommen werden.

Es wird erkennbar, dass sich durch die Intensität und Art der unterschiedlichen Bodenbearbeitung zahlreiche Vor- und Nachteile ergeben. In dieser Hinsicht seien optische Aspekte, Verteilung nichtmobiler Nährstoffe, Verdunstung, Verdichtung, Belüftung, Humusauf- und Humusabbau, Entwicklung der Bodenfauna, Maschineneinsatz und die Verwendung von Unkrautbekämpfungsmitteln aufgeführt. Ausführungen hierzu können u.a. DVWK (1985), BUCHNER & KÖLLER (1990) sowie KTBL (1993) entnommen werden. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist das Ermitteln und Bewerten von Unterschieden im N-Haushalt und dem N-Austragsvermögen zwischen konventioneller und den konservierenden Formen der Bodenbearbeitung.

3.6.2 Bewirtschaftung im Untersuchungszeitraum

Der Untersuchungsschlag wurde bis 1992 konventiell mit dem Pflug bearbeitet. Im Laufe des Jahres 1992 wurden die 4 Großparzellen eingerichtet. Diese sind in der Abb. 6 dargestellt. Von West nach Ost wurden die Varianten Pflug, Direkt, Konservierend und Konservierend Locker angelegt. Aus Gründen der Lesbarkeit wurde in einigen Abbildungen auf die schraffierte Darstellung der Bodenbearbeitungsvarianten verzichtet. Die Anordnung der Varianten P, D, K und KL von West nach Ost bleibt erhalten und ist durch die Darstellung der Bearbeitungsgrenzen erkennbar. Die Großparzellen haben eine durchschnittliche Fläche von ca. 6 ha.

Der betrachtete Untersuchungszeitraum der vorliegenden Arbeit erstreckt sich in Bezug auf den Wasserhaushalt und Stickstoffaustrag von 1999 bis 2001. Im Jahr 1999 wurden Zuckerrüben angebaut. In den Anbaujahren 2000 und 2001 wurde die Fläche mit Winterweizen bestellt. Im Herbst der Jahre 1998 und 2001 wurde jeweils Senf als Zwischenfrucht angebaut.

Die durchgeführten Bodenbearbeitungsmaßnahmen und deren zeitliche Einordnung sind in den Tabellen Tab. A 1 bis Tab. A 4 dargestellt. In diesen Tabellen sind die Termine der jeweiligen Stoppelbearbeitung, Grundbodenbearbeitung, Saatbettbereitung, Aussaat, Düngung, Einsatz von Unkraut- und Schädlingsbekämpfungsmitteln sowie der Ernte aufgeführt.

4 Methodik

4.1 Untersuchungskonzept

Die Abb. 7 kennzeichnet die einzelnen untersuchten Kompartimente des Agrarökosystems Schlag Lüttewitz. Durch die Abbildung wird eine klare Datenursprungstrennung ersichtlich. Es handelt sich um eine integrierte Arbeit. Verschiedene Untersuchungsparameter waren durch die Messreihen der LfL vorgegeben. Diese wurden durch die eigene Untersuchung relevanter Parameter ergänzt, untermauert und in einen größeren Kontext eingebunden.

Nach NEUMEISTER (1988) werden alle in Wissenschaft und Praxis benötigten Aussagen in unterschiedlichen Ebenen der Detailliertheit benötigt. Deshalb ist für die jeweiligen Ebenen der Grad der zulässigen Vereinfachung zu bestimmen. Ziel der vorliegenden Untersuchungen war die Erfassung des spezifischen Nitrataustrages zwischen den 4 Bearbeitungsvarianten und dessen Bewertung. Dafür wurden Parameter verschiedene Ebenen kombiniert.

Die Parameter des Stickstoffhaushaltes lagen als 3 jährige Messreihe des Nmin-Gehaltes von Bodenproben der Tiefenstufen 0 – 30 cm, 30 - 60 cm, 60 – 90 cm sowie als 2 jährige Messreihe des Nmin-Gehaltes von Bodenlösungen der Tiefenstufe 90 cm vor. Neben diesen Daten wurden auch die Parameter des C/N-Verhältnisses über 3 Jahre an stationären Messplätzen analysiert. Die eigenen Untersuchungen beschäftigten sich mit der Auswertung dieser Daten. Weiterhin wurden die Daten zum Wasserhaushalt ausgewertet und entsprechende Berechnungen zur potentiellen Evapotranspiration, zur klimatischen Wasserbilanz, zum Oberflächenabfluss sowie zu den Sickerwassermengen und der Nitratfracht durchgeführt. Außerdem sollte der Reliefeinfluss geklärt werden. Hierfür wurde ein digitales Geländemodell (DGM) durch Höhenpunktaufnahme vor Ort erstellt.

Um die punktuellen Stickstoffparameter der Bodenproben und Bodenlösungen besser einordnen und Aussagen zur Entwicklung der Fläche hinsichtlich des Stickstoffhaushaltes machen zu können, wurde über die relevante Fläche des Schlages eine Bohrstockbeprobung durchgeführt. Es wurden die Tiefenstufen 0 - 5 cm, 5 – 30 cm, 30 – 60 cm beprobt und die Corg- und Nt-Gehalte analysiert. Gleichzeitig wurde die Mächtigkeit des Ap-Horizontes und wenn vorhanden des M-Horizontes aufgenommen. Die Beprobungspunkte wurden mittels DGPS aufgenommen und konnten im DGM präzise dargestellt werden.

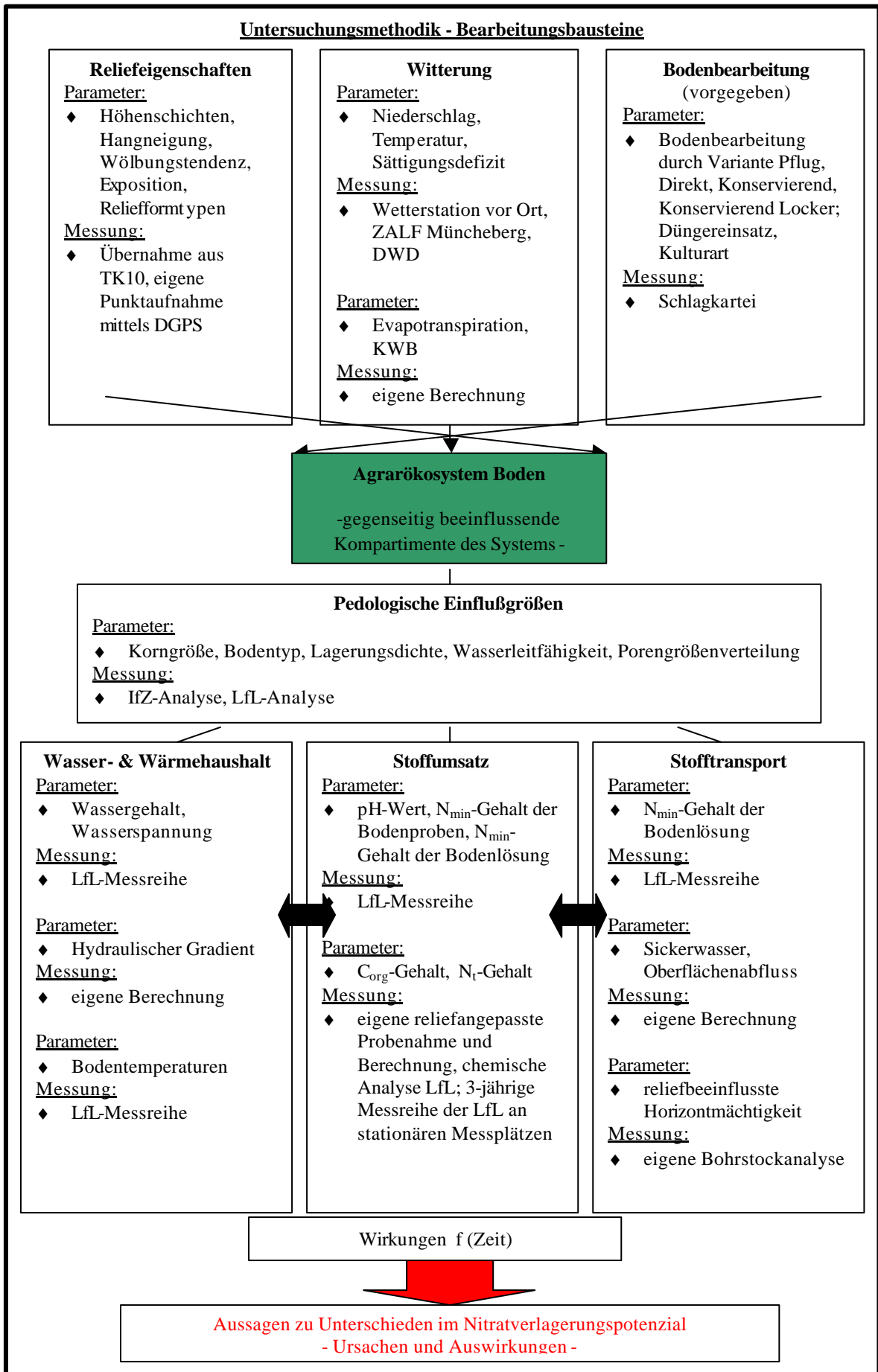


Abb. 7. Die Untersuchungsmethodik – verwendete Daten und ihre Quellen.

Die Abb. 8 bildet zusammenfassend das Grundgerüst der vorliegenden Untersuchung ab. Nach NEUMEISTER (1999) kennzeichnet dieses Dreieck die unverzichtbaren Kategorien bei in geographische Betrachtungsweisen eingebundenen Untersuchungen.

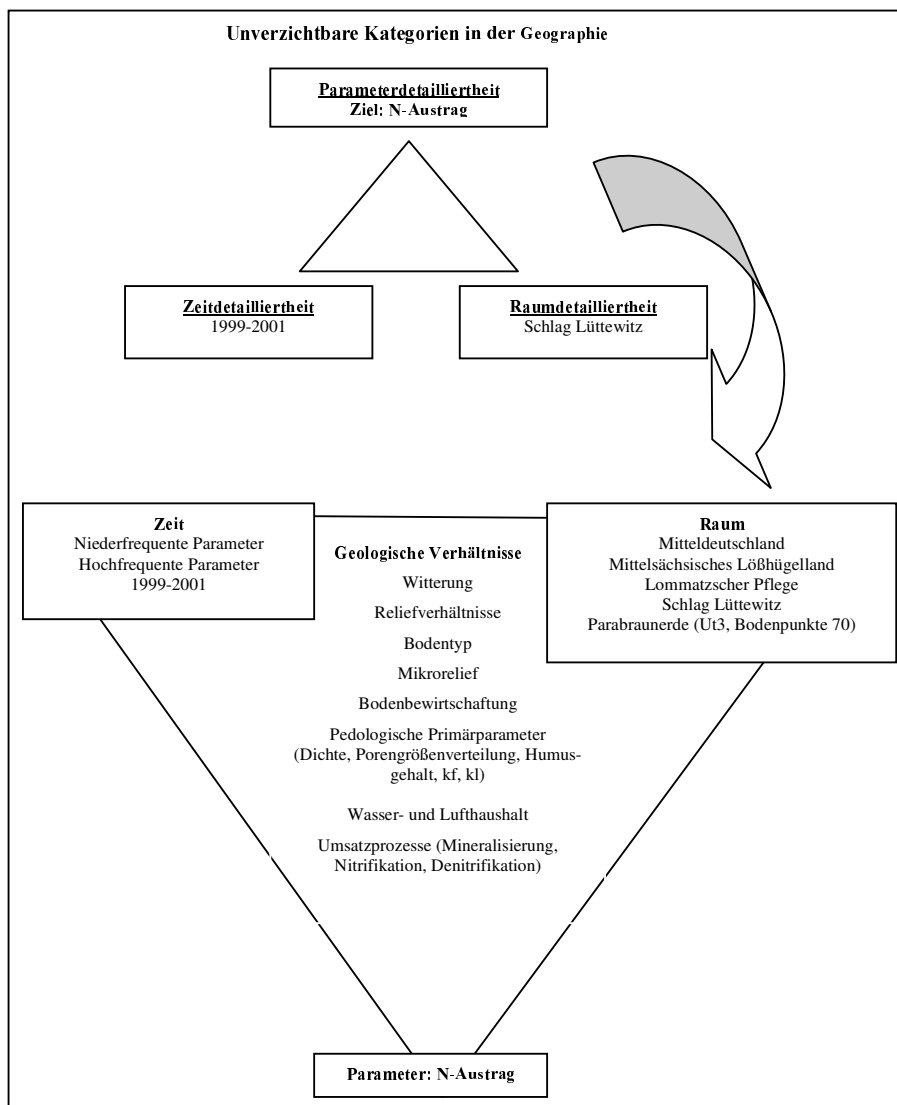


Abb. 8. unverzichtbare Kategorien bei geographischen Untersuchungen – Hierarchieebenen.

In der Abb. 8 sind die 3 Eckdaten Raum, Zeit und Parameter ersichtlich. Die einzelnen beeinflussenden Faktoren und Betrachtungsebenen sind hierarchisch geordnet. Ziel ist die Beurteilung des Parameters N-Austrag. Erkennbar wird, dass der Parameter N-Austrag um so sensibler zu beeinflussen ist, je weiter unten im Dreieck eine Veränderung der Einflussgrößen erfolgt. Die verwendeten Methoden werden im Anschluss erläutert.

4.2 Bodenphysikalische Untersuchungsmethoden

Eine Korngrößenanalyse wurde 1999 durch den FB 10 der LfL nach dem Sieb- und Pipettverfahren nach KÖHN (DIN 19683, Teil 2) durchgeführt. Die Analyse wurde in den Varianten Pflug, Direkt und Konservierend an Bodenproben der Tiefenstufen 0 - 30 cm, 30 - 40 cm, 40 - 60 cm, 60 - 90 cm vorgenommen.

Die Bestimmung der Trockenrohddichte (d_B) wurde an ungestörten Proben nach E DIN ISO 11272 (DIN 2000) durchgeführt. Die Beprobung erfolgte in den Jahren 1999, 2000 und 2001. Je nach Fragestellung wurden in den einzelnen Jahren teilweise unterschiedliche Tiefen untersucht. Im Jahr 1999 wurde die Variante KL zur Bestimmung der Trockenrohddichte aus arbeitstechnischen Gründen nicht beprobt.

Das Porenvolumen wurde aus der Trockenrohddichte nach

$$PV = 1 - d_B/d_F$$

errechnet. Für d_F wurde die Dichte der festen Bodensubstanz $d_F = 2,65 \text{ g/cm}^3$ nach HARTGE & HORN (1989) verwendet. Die Porengrößenverteilung wurde an ungestörten Proben mit einem Überdruck entsprechend pF 1,8, pF 2,0, pF 2,5, pF 3,0 und pF 3,2 und an gestörten Proben bei einem Überdruck entsprechend pF 4,2 ermittelt. Die verwendete Methodik der Hochdruckapparatur ist bei SCHLICHTING et al. (1995) beschrieben. Die Porenverteilung wurde anhand der Desorptionskurve ermittelt und nach KA 4 (1996) in Porenbereiche eingeteilt. Im Jahr 1999 wurden die Varianten P, D und K in den Tiefen 0 – 4 cm, 14 - 18 cm, 28 – 32 cm, 56 – 60 cm und 90 – 94 cm untersucht. Im Jahr 2000 wurden alle 4 Varianten in den Tiefen 10 – 15 cm, 20 – 25 cm, 30 – 35 cm und 45 – 50 cm beprobt.

Die Bodentemperaturen wurden im Frühjahr 1999 im wöchentlichen Rhythmus in den Tiefen 1 cm, 5 cm und 10 cm mit Einstichthermometern in den Varianten P, D und K gemessen.

Die maximale Wasserinfiltrationsleistung eines Bodens kann durch die gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) ausgedrückt werden. Diese wurde nach DIN 19682, Teil 8 ermittelt. Die Probenahme erfolgte in vertikaler Richtung, um den Makroporeneinfluss zu erfassen. In Anlehnung an SCHLICHTING et al. (1995) wurden die Messungen mit einem Haubenpermeameter durchgeführt. Nach HARTGE & HORN (1989) können durch die Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit beginnende Veränderungen der Bodenstruktur erfasst werden.

Die Luftleitfähigkeit (kl) wurde im Labor an ungestörten Proben aus den Tiefen 20 cm und 40 cm entnommen bei den Entwässerungsstufen von pF 1,8 und pF 2,5 nach DIN 19682, Teil 9 mit dem Air Permeability Meter PL 200 der Firma UGT-GmbH gemessen. Die Luftleitfähigkeit ist ein geeigneter Beiwert zur Bodendichte, um z.B. kontinuierliche Makroporen zu erfassen. Nach SCHLICHTING et al. (1995) hängt die Luftleitfähigkeit von der Zahl, der Größe und Kontinuität luftführender Hohlräume einer Bodenlage ab, schwankt also mit dem Wassergehalt.

Die beschriebenen Methoden der Beprobung und Analyse wurden durch die LfL durchgeführt.

Für eine quasi-flächenhafte Beprobung der Parameter Corg und Nt wurde ein eigenes Beprobungsraster entwickelt (Abb. 9). Dabei wurden die Probepunkte höhenschichtenangepasst ausgewählt, um einen gewissen Homogenitätsgrad und die entsprechende Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Die Punkte wurden im Feld mittels DGPS eingemessen und standen so für eine exakte Auswertung in Verbindung mit geographischen Informationssystemen (GIS) zur Verfügung. Die Entnahme der Proben zur Corg- und Nt-Bestimmung (s. Abb. 9) erfolgte manuell mittels Pürckhauer-Bohrstock und Spaten. Es wurden die Tiefen 0 - 5cm, 5 - 30 cm und 30 - 60 cm beprobt, um die Parameter in die Messreihen der LfL einzuordnen und die unterschiedlichen charakteristischen Bearbeitungseinflüsse der Bodenbearbeitungsvarianten erfassen zu können. Aus 3 im Abstand von ca. 6 m entnommenen Bodenproben wurde jeweils eine Mischprobe je Tiefestufe zusammengestellt. Die Proben wurden in PE-Beutel abgefüllt, kühl gelagert und dem FB 10 (LUFA) zur Analyse übergeben.

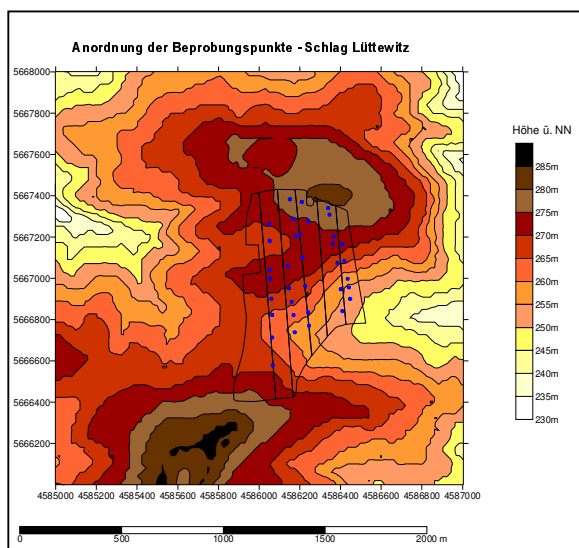


Abb. 9. Beprobungsraster der flächenhaften Untersuchung.

An einer Stelle mit einer homogenen Bodeneinheit (Abb. 6) nach TEIWES (1997) und geringem Reliefeinfluss wurde ein Referenzpunkt angelegt, um die ausgewählte Methodik der Mischprobenherstellung und die daraus resultierenden Aussagen zu bewerten. An dem eingemessenen Punkt wurden alle Proben der einzelnen Tiefen der 3 parallelen Bohrstöcke separat entnommen und analysiert.

Da die Bearbeitungsvarianten unterschiedliche Längen aufweisen, wurde die Anzahl der Beprobungspunkte je Bearbeitungsvariante angepasst. Demnach entfielen auf die Varianten P und D jeweils 8 Punkte, auf die Varianten K und KL jeweils 7 Punkte sowie auf die östliche Restfläche 5 Punkte. Diese Restfläche kennzeichnet die betriebsübliche Bodenbearbeitung. Diese ähnelt der Bewirtschaftung der Variante K, wobei auf der Restfläche in größeren Abständen eine Tiefenlockerung durchgeführt wird. Die Fläche wurde als Vergleich aufgenommen.

Die Varianten P und D wurden am 31.01.02, die Varianten K, KL und die Restfläche wurden am 01.02.02 beprobt. Die Probenahme wurde zu diesem Zeitpunkt durchgeführt, um eine Beurteilung der zu untersuchenden Parameter vor der Vegetationsperiode zu ermöglichen. In Verbindung mit der Probenahme wurden die Horizontmächtigkeiten der Ap-Horizonte und wenn vorhanden der M-Horizonte aufgenommen. Hierdurch sollte der Reliefeinfluss auf die Materialumlagerungen erfasst werden.

4.3 Bodenchemische Untersuchungsmethoden

Der pH-Wert wurde im Jahr 2000 nach Entnahme von Bodenproben aus den Tiefen 0 - 5 cm, 5 - 10 cm, 10 - 20 cm, 20 - 30 cm, 30 - 60 cm und 60 - 90 cm in einfacher Wiederholung in einer Calciumchlorid-Lösung nach VDLUFA MB I A 5.1.1 (VDLUFA-Methodenvorschriften, 1991) ermittelt. Im Jahr 2001 erfolgte die Messung an Bodenmaterial der Tiefenstufen 0 – 5 cm, 5 – 10 cm, 10 – 20 cm und 20 – 30 cm. Der pH-Wert ist eine einfach messbare, sensible Größe, welche weitreichenden Einfluss auf Bodenfunktionen, wie Pufferkapazität, Filtervermögen und Mineralstabilität hat (FRANKE & NEUMEISTER, 1999).

Die Gewinnung von Daten zum N-Haushalt wurde über die Entnahme von Bodenproben und der Gewinnung von Bodenlösung realisiert. Die Entnahme von Bodenproben erfolgte im Zeitraum vom Jahr 1999 bis 2001 im monatlichen bis zweimonatlichen Rhythmus in der unmittel-

telbaren Umgebung der stationären Messplätze. In jeder Bearbeitungsvariante wurden 5 Mischproben aus den Tiefen 0 - 30 cm, 30 - 60 cm und 60 - 90 cm zur N_{min}-Bestimmung entnommen. Nach SCHLICHTING et al. (1995) gibt der Mineralstickstoff den aktuellen pflanzenverfügbaren N-Anteil eines Bodens an, welcher gleichzeitig auch der auswaschungsgefährdete N-Anteil ist. Die Probenahme erfolgte mittels Bohrstock. Die Proben wurden in Kühlboxen transportiert, um Umsatzprozesse zu verlangsamen.

Die Probenahme der Bodenlösung wurde über Saugkerzen realisiert, welche an den Messplätzen installiert waren. Die Bodenlösung wurde mittels Unterdruck in die Keramiksaugkerzen überführt und von dort mit einer Absaug-Vorrichtung gewonnen und in einem Sammelbehälter aufbewahrt. Die Methode ist u.a. bei SCHLICHTING et al. (1995) beschrieben. Entsprechend vertiefende Ausführungen finden sich bei GROSSMANN (1988) und RIEß (1993). Die Probenahme erfolgte, wenn arbeitstechnisch möglich, im wöchentlichen Rhythmus im Frühjahr der Jahre 2000 und 2001. Die Bodenlösung wurde in 90 cm Tiefe mit einem angelegten Unterdruck von 200 hPa in 3-facher Wiederholung gesammelt. Es wurde ein Keramikkopf der Marke P-80 verwendet.

Durch die N_{min}-Methode kann der jahreszeitliche Gang der N-Mineralisation und die N-Immobilisierung erfasst werden. Für eine Düngeempfehlung werden nach WEHRMANN & SCHARF (1979) im zeitigen Frühjahr N_{min}-Proben aus der durchwurzelten Bodenzone gezogen. Vom N-Sollwert der Kulturpflanze wird der ermittelte N_{min}-Wert abgezogen, um die notwendige Düngermenge zu bestimmen. Des Weiteren ist eine Stickstoffnachlieferung des Bodens und ein Pflanzenentzug zu berücksichtigen. Die Bestimmung der N_{min}-Werte der Bodenproben und der Bodenlösungen wurde durch die LUFA nach der VDLUFA-Methodenvorschrift (1991) VDLUFA MB I A 6.1.3.2 durchgeführt. Die bestimmten Konzentrationen an Nitrat und Ammonium wurden für die Bodenproben in die Konzentration kg N/ha umgerechnet. Die Werte des Nitratgehaltes und des Ammoniumgehaltes der Bodenlösungen liegen in der Einheit mg NO₃⁻/l bzw. NH₄⁺/l vor.

Die Probenahme für eine C_{org}- und N_t-Bestimmung von Bodenproben in der Umgebung der Messplätze erfolgte ebenfalls mittels Bohrstockbeprobung. Es wurden die Tiefenstufen 0 - 5 cm, 5 - 10 cm, 10 - 20 cm, 20 - 30 cm, 30 - 60 cm, 60 - 90 cm beprobt. Dies wurde zweimalig 1999 und jeweils einmal im Herbst 2000 und im Herbst 2001 durchgeführt.

Eine Carbonatbestimmung wurde nach der VDLUFA-Methodenvorschrift (1991) VDLUFA MB I A 5.3.1 durchgeführt. Der organische Kohlenstoff (Corg) und der Gesamtstickstoff (Nt) wurden durch trockene Verbrennung nach DIN ISO 10694 (DIN 2000) ermittelt. Die Analyse erfolgte durch die LUFA mittels Elementaranalysator CHN-1000 der Firma LECO. Das untersuchte Bodenmaterial enthielt kein Carbonat. Der ermittelte Kohlenstoffgehalt spiegelt somit den Gehalt an organischem Kohlenstoff wieder. Die Beschreibung des Verfahrens ist neben der DIN – Vorschrift auch bei SCHLICHTING et al. (1995) einsehbar.

Nach DVWK (1985) weist jeder Boden einen standorttypischen Humusspiegel auf, welcher durch die mittleren Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte charakterisiert wird. Dabei erfolgt eine höhere N-Mineralisation, je enger das C/N-Verhältnis ist. Der Humusgehalt der Proben wurde durch Multiplikation des Corg-Gehaltes mit dem Faktor 1,724 errechnet (KA 4, 1994). Die Gehalte werden in Masse-% angegeben. Für eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den Bearbeitungsvarianten wurden die Humusgehalte in die Einheit kg/m^2 und t/ha umgerechnet. Dies erfolgte nach SCHLICHTING et al. (1995). Bei dieser Betrachtung konnte der wichtige Faktor Dichte berücksichtigt werden.

4.4 Wasserhaushaltsuntersuchungen

4.4.1 Witterungsverlauf im Untersuchungszeitraum

Es wurde der Witterungsverlauf im Untersuchungszeitraum durch entsprechende Parameter analysiert und die klimatische Wasserbilanz berechnet. Die 3 Untersuchungsjahre wurden innerhalb langjähriger Witterungsbetrachtungen eingeordnet.

Temperatur und Niederschlag

Die Daten für den Schlag Lüttewitz wurden von der Wetterstation in Klein Mockritz übernommen. Diese Wetterstation befindet sich ca. 1 km vom Schlag Lüttewitz entfernt und wird in Abbildungen als Station Lüttewitz bezeichnet. Weiterhin wurden die Witterungsdaten Temperatur, Niederschlag und Luftfeuchte der LfL Messstation in Nossen verwendet. Diese Messstation befindet sich ca. 15 km vom Schlag Lüttewitz entfernt. Die Parameter wurden als Vergleichswerte verwendet, um die Heterogenität des Mikroklimas aufzuzeigen. Außerdem wurden von dieser Messstation die langjährigen Mittel der Temperatur und des Niederschlages genutzt, um den untersuchten 3-jährigen Messzeitraum einzuordnen. Bei den Nieder-

schlagsmessgeräten beider Stationen handelt es sich um automatische Regenmesser mit Wippe und 0,1 mm Eichung.

Für die Ermittlung der klimatischen Wasserbilanz wurden der Niederschlag und die potenzielle Evapotranspiration (ET_{pot}) im Messzeitraum benötigt. Die ET_{pot} mit den Eingangsparametern der Station Nossen wurde aus dem Sättigungsdefizit errechnet. Das Sättigungsdefizit kennzeichnet die noch bestehende Aufnahmefähigkeit der Luft für Wasserdampf. Die Berechnungen des Sättigungsdampfdruckes wurden anhand der Magnus-Formel nach DVWK (1996) durchgeführt.

$$\Delta pL = (e_s - e)$$

$$e_s(T) = 6,11 * \exp \left(\frac{17,62 * T(t)}{243,12 + T(t)} \right) \quad \text{bei } 0^\circ < T \leq 60^\circ \text{C}$$

$$e_s(T) = 6,11 * \exp \left(\frac{22,46 * T(t)}{272,62 + T(t)} \right) \quad \text{bei } -65^\circ \leq T \leq 0^\circ \text{C}$$

$$e = e_s(T) * U/100$$

hierbei sind:

ΔpL Sättigungsdefizit in hPa

e_s maximaler Dampfdruck in hPa

e Dampfdruck der Luft in hPa

$e_s(T)$ maximaler Dampfdruck in hPa in Abhängigkeit von der Temperatur

$T(t)$ Temperatur in °C zum Mittagstermin 14 Uhr

U relative Luftfeuchte in %

Das Sättigungsdefizit der Wetterstation Klein Mockritz wurde tageweise für die 3 Untersuchungsjahre vom ZALF Müncheberg bereitgestellt. Um die Heterogenitäten des Mikroklimas aufzuzeigen, wurden die Sättigungsdefizite der beiden Wetterstationen miteinander verglichen.

Nach KA 4 (1994) ist die potenzielle Evapotranspiration (ET_{pot}) die maximal mögliche Verdunstung, welche unter Standardbedingungen eintreten würde. Die Evapotranspiration setzt sich aus der unmittelbaren Verdunstung von Oberflächen (Evaporation) und der Aufnahme und Transpiration durch die Pflanzen zusammen. Die ET_{pot} wurde nach der HAUDE-Formel (1955) berechnet.

$$ET_{pot} [mm] = f [mm/hPa] * \Delta pL [hPa]_{14 \text{ Uhr}}$$

hierbei sind:

f empirischer HAUDE-Faktor

ΔpL Sättigungsdefizit zum 14 Uhr-Termin

Diese Formel ermöglicht die Berechnung der potenziellen Verdunstung von natürlichen Oberflächen und Pflanzenbeständen aus dem Sättigungsdefizit und einem empirischen Faktor. Da diese Formel an Tagen mit einem hohen Sättigungsdefizit zu hohe Werte der ET_{pot} berechnet, wurden die Werte > 6,5 mm geschnitten und gleich 6,5 mm gesetzt. Nach DVWK (1984) sind diese hohen potenziellen Evapotranspirationswerte in unseren Breiten aufgrund der limitierend wirkenden Strahlungsenergie nicht möglich.

Weiterhin wurde als Vergleich zur potenziellen Evapotranspiration die aktuelle Evapotranspiration (ET_{akt}) nach VAN EIMERN & HÄCKEL (1979) errechnet. Bei dieser Berechnung wird die aktuelle Bodenfeuchte berücksichtigt. Besonders bei geringen Bodenfeuchten liegt die aktuelle Evapotranspiration näher an den realen Verdunstungsverhältnissen.

$$ET_{akt} = \sin^2 b * ET_{pot}$$

hierbei sind:

ET_{akt} aktuelle Evapotranspiration in mm

ET_{pot} potenzielle Evapotranspiration in mm

b Bodenfeuchte in % der nutzbaren Feldkapazität

Die ET_{akt} wurde errechnet, um eventuelle Abweichungen zu den Annahmen der ET_{pot} aufzuzeigen und die Berechnungen einschätzen zu können. Durch die Darstellung der ET_{akt} ist

es möglich, die Evapotranspiration zwischen den einzelnen Varianten zu betrachten und Unterschiede im Wasserhaushalt zu erklären.

Nach DVWK (1996) handelt es sich bei den HAUDE-Faktoren um Werte einer Funktion der Windgeschwindigkeit, welche abhängig vom Monat und dem jeweiligen Pflanzenwuchs sind. Als HAUDE-Faktoren wurden die Faktoren nach LÖPMEIER (1994) verwendet (Tab. 1). Weitere Faktoren für die unterschiedlichen Kulturarten finden sich u.a. bei DVWK (1984), WANTULLA (1987), WENDLING et al. (1991), RIEß (1993).

Tab. 1. verwendete HAUDE-Faktoren nach LÖPMEIER (1994).

Monat	HAUDE-Faktor f [mm/hPa]	
	Zuckerrüben 1999	Winterweizen 2000, 2001
Januar	0,15	0,18
Februar	0,15	0,18
März	0,18	0,19
April	0,15	0,26
Mai	0,23	0,34
Juni	0,30	0,38
Juli	0,36	0,34
August	0,32	0,22
September	0,26	0,21
Oktober	0,19	0,20
November	0,14	0,18
Dezember	0,14	0,18

Durch die KWB ist es möglich, Aussagen darüber zu treffen, welche Wassermengen dem Boden natürlich entzogen und zugeführt werden. Positive Werte kennzeichnen Wasserüberschuss und negative Werte einen Wassermangel. Die Auflösung ist bis auf Tagesebene möglich. Dennoch ist eine wochen- oder monatsbezogene Betrachtung aufgrund der Abweichungen der ETpot von den realen Verdunstungsverhältnissen sinnvoll. Die Berechnung der KWB wird u.a. bei WENDLING et al. (1991), KA 4 (1994), SCHLICHTING et al. (1995) aufgeführt. Die KWB und die nFK eines Bodens können zur Abschätzung der Beregnungsbedürftigkeit eines Standortes verwendet werden. Die KWB für den Schlag Lüttewitz wurde mit den Parametern der Wetterstation Klein Mockritz berechnet nach:

$$KWB = N - ET_{pot}$$

hierbei sind:

N Niederschlag in mm
 ET_{pot} potenzielle Evapotranspiration in mm

4.4.2 Kennzeichnung des Bodenwasserhaushaltes

Der Bodenwasserhaushalt wurde im Untersuchungszeitraum 1999 – 2001 durch die wöchentliche Messung des Wassergehaltes und der Wasserspannung zwischen der Aussaat und Ernte der Kulturpflanzen charakterisiert. Aus der klimatischen Wasserbilanz und der Abflussberechnung mittels des Erosionsmodells E 2D wurden über einen einfachen Sickerwasseransatz die Sickerwassermengen für die verschiedenen Bearbeitungsvarianten errechnet. Die Sickerwassermengen wurden für die Berechnung des N-Austrages benötigt.

Die Messung des volumetrischen Wassergehaltes erfolgte in jeder Bearbeitungsvariante mittels Time-Domain Reflectometry (TDR) in den Tiefen 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm, 60 cm, 70 cm und 80 cm mit jeweils 3 Wiederholungen pro Tiefenstufe. Die Messungen erfolgten von 1999 – 2001 im wöchentlichen Rhythmus zwischen der Aussaat und Ernte. Im Jahr 1999 konnte eine Messung in der Variante KL nicht erfolgen. Es wurde ein Messgerät der Marke TRIME-FM verwendet. Das Messprinzip ist u.a. bei TOPP et al. (1985), HARTGE & HORN (1989), SCHLICHTING et al. (1995), SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1998) erläutert. Bei diesem indirekten Messprinzip handelt es sich um eine genaue und schnelle Methode zur Bestimmung des volumetrischen Wassergehaltes in porösen Medien.

Nach HARTGE & HORN (1989) ist für das Pflanzenwachstum nicht die Wassermenge, sondern die Wasserbindung von entscheidender Bedeutung. Diese Wasserbindung wurde mittels Tensiometern mit einem keramischen P-80-Kopf ermittelt. Die Messungen erfolgten von 1999 – 2001 wöchentlich zwischen der Aussaat und Ernte. In der Variante KL wurden 1999 keine Messungen der Saugspannungen durchgeführt. Die Methode ist u.a. bei HARTGE & HORN (1989) sowie SCHLICHTING et al. (1995) beschrieben. Die Wasserspannungen wurden in den Tiefenstufen 15 cm, 30 cm, 60 cm, 80 cm, 100 cm und 130 cm mit einem elektronischen Druckaufnehmer und jeweils 4 Wiederholungen gemessen. Die Messwerte wurden in der Größenordnung hPa ermittelt und sind in den Abbildungen als pH-Werte dargestellt.

Versickerungsberechnung

Um anfallende Sickerwassermengen einzuordnen und eine Nitratverlagerung abzuschätzen, wurde eine Sickerwasserberechnung durchgeführt. Sickerwasser ist nach KA 4 (1994) unterirdisches Wasser, welches sich unter Einwirkung der Schwerkraft abwärts bewegt. Es entsteht, wenn das durch Niederschläge dem Boden zugeführte Wasser nicht mehr gegen die Einwirkung der Schwerkraft gehalten werden kann. Dieses Wasser wird zum Teil als Sicker-

wasser in tiefere Zonen verlagert. Dabei wird im Boden bereits vorhandenes Wasser verdrängt und damit selbst zum Sickerwasser. Ein eventuell auftretender lateraler Wasserfluss wurde nicht berücksichtigt.

Die Sickerwasserberechnung wurde tageweise für 3 Ebenen durchgeführt. Eine Beurteilung der Sickerwassermengen wurde monatsweise und innerhalb der Zeiträume eines Wasserhaushaltsjahres, Winterhalbjahres und Sommerhalbjahres durchgeführt. Da Messwerte des Wassergehaltes und der Wasserspannung über einen Versuchszeitraum von 3 Jahren vorlagen, wurden diese Werte genutzt, um eine pF-Kurve (s. Abb. 10) zu erstellen, welche die Feldbedingungen widerspiegelt. Aus dieser pF-Kurve wurden die Grenzwassergehalte (s. Tab. 2) bei pF 1,8 für die weitere Berechnung ermittelt. Nach KA 4 (1994) ist für die auf dem Schlag ermittelte Bodenart Ut3 - Ut4 und die Trockenrohdichte ρ_t 3 eine Feldkapazität (FK) von 36 Vol.-% ausgewiesen.

Die zugrundeliegende vereinfachte Wasserhaushaltsgleichung wird üblicherweise für ebene Standorte verwendet, wobei der oberirdische Zu- und Abfluss vernachlässigbar ist und kein kapillarer Aufstieg aus dem Grundwasser berücksichtigt wird. Diese indirekte Methode wird im DVWK-Merblatt 217 (DVWK, 1990) beschrieben. Für eigene Zwecke fand eine Modifizierung statt. Demnach entsteht Sickerwasser, wenn der entsprechende Grenzwassergehalt (s. Tab. 2) überschritten wird. Dieser Grenzwassergehalt kennzeichnet somit die Feldkapazität unter Feldbedingungen. Dadurch wird die Spezifik der unterschiedlichen Wassergehalte der Bearbeitungsvarianten berücksichtigt. Für die Sickerwasserberechnung wurden die 3 Tiefenstufen 30 cm, 60 cm und 80 cm ausgewählt, weil für diese Ebenen jeweils Messwerte des Wassergehaltes und der Wasserspannung für den 3-jährigen Untersuchungszeitraum zur Verfügung standen.

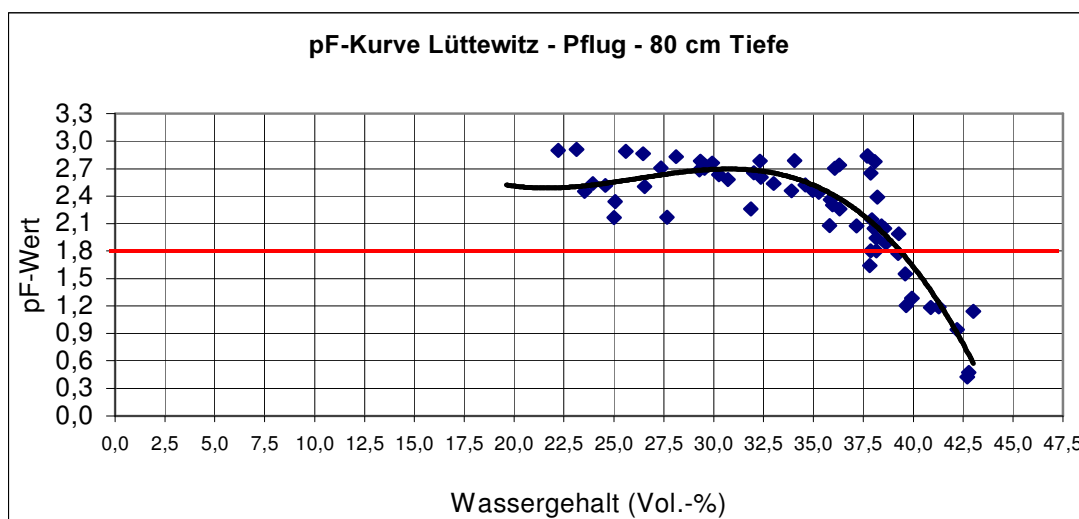


Abb. 10. Ermittlung des Grenzwassergehaltes (FK) – Beispiel Variante Pflug 80 cm Tiefe.

Für die Tiefenstufen der einzelnen Varianten ergaben sich somit die in Tab. 2 dargestellten Grenzwassergehalte unter realen Feldbedingungen.

Tab.2. Grenzwassergehalte der einzelnen Bodenbearbeitungsvarianten und Tiefen.

Ermittelte Feldkapazitäten				
Tiefe	Pflug	Direkt	Konservierend	Konservierend Locker
30 cm	34	35	36	32
60 cm	38	41	38	37
80cm	39	38	39	39
(Angaben in Vol.-%)				

Die FK ist nach KA 4 (1994) die Wassermenge, die ein Boden maximal gegen die Schwerkraft zurückhalten kann. Konventionell ist dies der Wassergehalt bei einer Saugspannung von pF 1,8. Die Feldkapazität ist vom Gleichgewichtszustand des Bodenwassers, von der Profiltiefe, der Körnung, dem Gehalt an organischer Substanz, dem Gefüge und der Horizontabfolge abhängig (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 1998).

Die Sickerwasserberechnung erfolgte nach der Formel:

$$S = (N - ET_{pot}) +/- V$$

hierbei sind:

S	Sickerwasser in mm
N	Niederschlag in mm
ET _{pot}	potenzielle Evapotranspiration
(N – ET _{pot})	klimatische Wasserbilanz (KWB) in mm
V	Wasservorratsänderung in mm

Es wurde täglich die KWB ermittelt und dem Wassergehalt des Bodens gegenübergestellt. Da der Wassergehalt in Vol.-% und mm/dm angegeben werden kann, konnte eine direkte Verrechnung mit den Werten der KWB erfolgen. Somit wurde das Sickerwasserverhalten für ein Bodenkompartiment von 1 dm Mächtigkeit erfasst. Wenn die KWB positiv ausfiel, stieg der Wassergehalt des Bodens. Wurde hierbei der ermittelte Grenzwassergehalt überschritten, wurde die darüber hinausgehende Menge als Sickerwasser betrachtet. Wenn die KWB negativ ausfiel, wurde der Wassergehalt um den entsprechenden Betrag verringert.

Diese Methodik wird u.a. bei WANTULLA (1987), RIEß (1993), TEEBKEN et al. (1994) beschrieben. Die Methodik konnte verbessert werden, indem nicht die Werte der FK nach KA 4 (1994) auf Grundlage der entsprechenden Bodenart, sondern die unter Feldbedingungen erfassten Grenzwassergehalte verwendet wurden. Weiterhin wurde dieses Modell flexibler gestaltet, indem ausgehend von einem TDR-Messtermin die Wassergehalte der entsprechenden Schicht durch die KWB erhöht oder verringert wurden. Durch die wöchentlichen TDR-Messtermine konnte dieses Modell entsprechend kalibriert werden, da die gemessenen Wassergehalte als Ausgangswassergehalt für die nächste Woche eingesetzt wurden.

Da sich die Messplätze am Hang befanden, musste der Oberflächenabfluss, welcher sich in den einzelnen Varianten deutlich unterscheidet, berücksichtigt werden. Dies konnte durch die Verwendung des Erosionsmodells E 2D erfolgen. Eine Verwendung dieses Modells war durch die umfangreiche Validierung in Sachsen im Rahmen des von der LfL und LFUG durchgeführten „Bodenerosionsmessprogramms Sachsen“ zweckmäßig.

Bei dem Modell handelt es sich um ein physikalisch begründetes, computergestütztes Modell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser an Einzelhängen. Dieses Modell berechnet den durch Oberflächenabfluss entstehenden Feststoffabtrag vom Hang, das Volumen des zu erwartenden Oberflächenabflusses sowie die Feststoffdepositionen innerhalb des Hangprofils für einzelne Niederschlagsereignisse (SCHMIDT et al., 1996 a). Die hydrologischen Teilprozesse sind auf Grundlage des Infiltrationsansatzes von GRENN & AMPT (1911) modelliert (zit. nach SCHMIDT et al., 1996 a). Über einen Faktor erfolgt die Anpassung des Infiltrationsprozesses an die Verhältnisse der konservierenden Bodenbearbeitung. Eine Änderung der physikalisch-chemischen Bodeneigenschaften wird nicht simuliert. Auch dynamische Prozesse wie Verschlammung oder Tonquellung, welche den Infiltrationsprozess beeinflussen würden, werden nicht berücksichtigt.

Für die Berechnung des Oberflächenabflusses konnten die Eingangsparameter Niederschlag, Dichte, Corg-Gehalt und Anfangswassergehalt aus den Messreihen der 3 Untersuchungsjahre entnommen werden. Es muss festgehalten werden, dass die Parameter Anfangswassergehalt und Dichte sehr sensible Eingangsparameter darstellen. Die weiteren Parameter wurden aus dem Handbuch EROSION 2D/3D (SCHMIDT et al., 1996 a) entnommen. Durch die Definition eines Hangabschnittes wurde der Reliefeinfluss berücksichtigt. Aufgrund der Übernahme der Parameter Anfangswassergehalt und Dichte wurden die spezifischen gemessenen Unterschiede zwischen den Bearbeitungsvarianten berücksichtigt. Durch die Auswertung von

Starkregenereignissen und Niederschlagsserien durch den DWD mit Einbezug von 50 Wetterstationen in Sachsen, wurden die gewonnenen Punktdaten regionalisiert und entsprechende klimatische Subregionen gebildet. Der Untersuchungsschlag befindet sich demnach in der Subregion 3, dem Dresdner Elbtalgebiet.

Für die Berechnungen eines relevanten Oberflächenabflusses stand die Annahme im Vordergrund, dass dieser nur bei Starkregenereignissen auftritt. Hierfür wurden alle Tage innerhalb der 3 Untersuchungsjahre mit einem Niederschlag ≥ 20 mm betrachtet. Aus dem Handbuch E 2D/3D wurden für die Extremereignisse der Subregion 3 die entsprechenden Intensitäten der Niederschläge entnommen. Als vereinfachte Annahme ging voraus, dass der gemessene Gesamtniederschlag innerhalb von zwei Stunden fiel. Für die ermittelten Starkregenereignisse, die bis auf einige Ausnahmen in den Sommermonaten lagen, ist diese Annahme realistisch.

Tab. 3. Tage mit errechnetem Oberflächenabfluss nach EROSION 2D.

errechneter Abfluss [mm]						
Datum	N [mm]	Fruchtart	P [mm]	D [mm]	K [mm]	KL [mm]
18.06.99	49,2	Zuckerrüben	2,3	0,7	0	0
06.07.99	28,3	Zuckerrüben	2,6	0	0	0
07.07.99	45,1	Zuckerrüben	12,4	3,5	0	0
09.03.00	25,1	Winterweizen	0	0	0	0
17.05.00	40,1	Winterweizen	0	0	0	0
08.07.00	25,6	Winterweizen	0	0	0	0
20.08.00	20,5	Winterweizen	0	0	0	0
18.06.01	22,3	Winterweizen	0	0	0	0

Die berechneten Mengen (Tab. 3) des Oberflächenabflusses wurden von den Mengen des in die Versickerungsberechnung einfließenden Niederschlages abgezogen. Ein Oberflächenabfluss in der Direktsaatvariante wurde ermittelt, da die Parameter Anfangswassergehalt und Dichte sehr sensible Eingangsparameter des Programms darstellen. Die Variante Direkt wies im Untersuchungszeitraum hohe Trockenrohdichten und hohe Wassergehalte auf.

Hydraulischer Gradient

Weiterhin wurde eine Berechnung des hydraulischen Gradienten durchgeführt. Dieser Wert erlaubt die Aussage, ob und in welche Richtung eine Wasserbewegung stattfindet. Demnach konnte hiermit erfasst werden, ob es zum Fließen der errechneten Sickerwassermengen kommt. In die Berechnung des hydraulischen Gradienten fließen das Matrixpotenzial ψ und das Gravitationspotenzial z ein. Als Bezugsebene wurde die Erdoberfläche gewählt. Die Be-

rechnung ist u.a. bei EHLERS (1996) und SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1998) erläutert.

Der hydraulische Gradient wurde berechnet nach:

$$\frac{\Delta \varphi}{\Delta z} = \frac{(\psi_1 + z_1) - (\psi_2 + z_2)}{(z_1 - z_2)}$$

hierbei sind:

$\frac{\Delta \varphi}{\Delta z}$	hydraulischer Gradient
ψ_1	Matrixpotenzial der Ebene 1 in cm
ψ_2	Matrixpotenzial der Ebene 2 in cm
z_1	Gravitationspotenzial der Ebene 1 in cm
z_2	Gravitationspotenzial der Ebene 2 in cm

Die Parameter der Matrixpotenziale sind durch die Tensiometermessungen gegeben. Das Matrixpotenzial ist nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1998) ein Maß für den Einfluss der Bodenmatrix. Es umschließt alle durch die Matrix auf das Wasser ausgeübten Einwirkungen. Die Gravitationspotenziale stellen die verschiedenen Tensiometerebenen dar.

Die hydraulischen Gradienten wurden für die Kompartimente 15 – 30 cm, 30 – 60 cm, 60 – 80 cm, 80 – 100 cm und 100 – 130 cm ermittelt. Wenn der Gradient positive Werte erreicht, erfolgt eine Wasserbewegung nach unten. Bei negativen Werten erfolgt die Wasserbewegung nach oben. Bei einem Gradienten von Null findet keine Wasserbewegung statt. Durch die Berechnung des hydraulischen Gradienten kann die Möglichkeit der Versickerung aus den verschiedenen Kompartimenten beurteilt werden (EHLERS, 1996). Die Sickerwasserberechnung erfolgte für 3 Ebenen bis 80 cm Tiefe. Über diese Tiefe hinaus kann eine weitere Beurteilung des Sickerwasserverlaufs durch den hydraulischen Gradienten erfolgen.

Ein kapillarer Aufstieg konnte an den betrachteten Messpunkten außer Acht gelassen werden, da sich diese Punkte im Oberhangbereich befanden und ein Grundwasserflurabstand von mindestens 15 m gegeben ist. Oberflächliches Zuschusswasser und Interflow konnten nicht berücksichtigt werden. In diesem Ansatz wurde von schnell fließendem Sickerwasser ausgegangen. Langsam fließendes Sickerwasser tritt nach KA 4 (1994) auch bei pF-Werten bis 2,5 auf.

4.5 Digitale Reliefanalyse

Anhand von zwei digitalen Geländemodellen (DGM) wurden die Reliefanalysen für den Untersuchungsschlag durchgeführt. Neigung und Wölbung der Geländeoberfläche beeinflussen maßgeblich das Abflussgeschehen sowie den damit verbundenen Stofftransport (KA 4, 1994). Durch Wasser abgetragenes Bodenmaterial wird in Bereichen mit geringer Reliefenergie wieder abgelagert und kann hier zu Überdeckungen führen.

Durch die Reliefanalyse können Zuschusspositionen mit Wasserüberschuss ausgegrenzt werden. Die im Vergleich zur Ebene veränderten Verdunstungsbedingungen und Abflussbedingungen am Hang werden durch Karten der Hangneigung und Exposition analysiert. Unterschiede im Corg- und Nt-Gehalt, sowie Veränderungen der Horizontmächtigkeiten im Geländeprofil werden durch die Reliefanalyse erklärbar.

Es wurde ein DGM aus der TK 10 (N) Blatt 4845 SW Lüttewitz erstellt. Dafür wurden 4 km² mit der Software Arc View 3.2 digitalisiert. Eine Georeferenzierung von verwendeten Karten wurde mit der Software WASY-GeoReferenzierung Version 1.3 a durchgeführt. Dieses DGM 1 wurde für die Einordnung des Untersuchungsschlages in den größeren räumlichen Kontext verwendet. Weiterhin wurden in diesem Modell die Punkte für die flächenhafte Bohrstockprobenahme festgelegt. Bei der Auswertung und Untersuchungen vor Ort stellte sich heraus, dass die Auflösung dieses Modells für die weiteren Analysen und die spezielle Fragestellung nach dem Reliefeinfluss nur unzureichende Ergebnisse liefert.

Für eine feinere Auflösung der Reliefeigenschaften des Schlages wurden Höhenpunkte für ein eigenes DGM (DGM 2) vor Ort aufgenommen. Insgesamt wurden 1731 Punkte manuell eingemessen. Bei dem verwendeten Global Positioning System (GPS) handelte es sich um einen DGPS Korrekturempfänger. Durch dieses verwendete Differentielle Global Positioning System (DGPS) sind aufgrund der Übermittlung von Korrekturdaten durch Referenzstationen im Echtzeitmodus Messgenauigkeiten von besser als 1 m zu erreichen.

Die Aufnahme der Höhenpunkte wurde in einem ca. 20 m Raster durchgeführt. Bei der verwendeten Software handelte es sich um das Programm Field Rover II der Firma SST Development Group. Eine Koordinatentransformation der Geographischen Koordinaten wurde mit der Software TRANSDAT Testversion 7.73 und AGRO-Map Professional (AMP) der durch-

geführt. Es war eine Umwandlung der aufgenommenen Geographischen Koordinaten in Gauß-Krüger Koordinaten nötig, um die entsprechenden Karten mittels der Software Arc View 3.2 und Surfer 7.0 verbinden und weiterverarbeiten zu können.

Ein Teil der Oberflächenanalysen wurden mit ARC VIEW 3.2 und den Erweiterungen Spatial Analyst und 3D-Analyst vorgenommen. Die entsprechenden Analysen wurden hier auf Vektorbasis als Triangulated Irregular Network (TIN) und auf Rasterbasis (Grid) durchgeführt.

Hauptsächlich wurde jedoch das Programm Surfer Version 7.0 für die Analysen verwendet. Surfer 7.0 bietet gute Möglichkeiten der Analyse und Interpolation von Oberflächen auf Rasterbasis (Grid). Durch die digitale Reliefanalyse wurden grundlegende Eigenschaften des Reliefs wie Höhengliedertengliederung, Hangneigung, vertikale und horizontale Wölbung sowie Exposition für den Untersuchungsschlag rasterbezogen abgeleitet. Die grundlegenden Raster für das Höhenmodell, die Höhengliedertengliederung, die Exposition und die Wölbungstendenz wurden mit der Methode „radial basis function“ erstellt. Eine Glättung der Oberfläche erfolgte über die Funktion „Matrix Smooth“. Die Auswertung der Karten für die Corg- und Nt-Untersuchungen sowie die Horizontmächtigkeiten wurden durch klassifizierte Darstellungen der Beprobungspunkte durchgeführt. Die Interpolation der gemessenen Corg-Gehalte auf dem gesamten Untersuchungsschlag erfolgte mit der Griding-Methode „Inverse Distance to a Power“.

5 Ergebnisse

5.1 Bodenphysikalische Ergebnisse

Die Verbindung der einzelnen Parameter innerhalb des Agrarökosystems Schlag Lüttewitz verdeutlicht die Abb. A 1.

Im Gesamtprofil 0 – 90 cm wurde auf dem Untersuchungsschlag als Bodenart vorwiegend stark toniger Schluff (Ut4) ermittelt. Nur in der Variante P sind teilweise geringere Tongehalte dafür verantwortlich, dass hier die Bodenart mittel toniger Schluff bis 40 cm Tiefe zugeordnet wurde. In den Varianten D und K wurden in allen beprobten Tiefen geringfügig höhere Tongehalte (1 – 5 %) gegenüber der Variante P ermittelt. Den höchsten Tongehalt besitzt mit 24 % die Variante K in 40 – 60 cm Tiefe. Die Unterschiede bewegen sich in den nach KA 4 (1994) angegebenen Spanne der ausgewiesenen Bodenart.

Für alle Bearbeitungsvarianten war eine Dichtezunahme unterhalb des jeweiligen Bearbeitungshorizontes zu erkennen (LfL, 2001). Die Variante P besaß bis in den Unterboden geringe Trockenrohdichten. Für die Variante D wurden die höchsten Dichtlagerungen gegenüber den anderen Varianten im Krumbereich ermittelt. Bei der Analyse der Dichteentwicklung wurde erkennbar, dass sich die Dichten in der Variante P in allen Tiefen jedes Jahr verringert haben. Im Gesamtprofil 0 – 90 cm Tiefe wies die Variante P in den Jahren 1999 und 2000 die geringsten Dichten auf. Diese lagen mit Werten von 1,35 – 1,42 g/cm³ in der Dichteklasse gering (KA 4, 1994). In der Variante D fand vom Jahr 1999 zum Jahr 2000 ebenfalls eine Verringerung der Dichte in allen Tiefen statt. Mit Werten von 1,47 – 1,53 g/cm³ im Gesamtprofil 0 – 90 cm lag diese Variante in beiden Jahren im Bereich der Dichtestufe mittel.

Die Werte in der Variante K streuten stark zwischen den Untersuchungsjahren. Die Trockenrohdichten waren in dieser Variante im Jahr 2000 im Vergleich zum Jahr 1999 deutlich höher. Für die Variante K konnte kein eindeutiger Trend in der Dichteentwicklung ausgemacht werden. Mit Werten von 1,44 – 1,57 g/cm³ im Gesamtprofil lag diese Variante im Bereich mittlerer Dichtestufen. Für die Variante KL konnte keine Dichteentwicklung aufgezeigt werden, da diese Variante nur im Jahr 2000 und in einzelnen Tiefen im Jahr 2001 untersucht wurde. Der Dichtewert von 1,39 g/cm³ für das Gesamtprofil lag im Bereich geringer Dichten.

Bei einer Betrachtung der Oberkrume 0 – 15 cm wurde deutlich, dass die Varianten D und K höhere Dichten im Vergleich zur Variante P aufwiesen. Die Variante KL ist im Oberkrumen-

bereich deutlich lockerer als die Variante P. An dieser Stelle sei noch einmal auf die Dichte als sensiblen Eingangsparameter für das verwendete Erosionsmodell EROSION 2D verwiesen.

Die Verteilung der Porenbereiche ist exemplarisch für die Varianten P und D dargestellt. Im Jahr 1999 wurden Zuckerrüben (ZR) angebaut. Die Kenngrößen Totwasser (TW), nutzbare Feldkapazität (nFK), Luftkapazität (LK) und Festsubstanz (FS) sind in den Abb. 11 und Abb. 12 erkennbar. Aus den Untersuchungen von 1999 wird erkennbar, dass die Variante D gegenüber der Variante P deutlich geringere Werte der Luftkapazität aufwies. Weiterhin wird deutlich, dass die Variante D im Gesamtprofil einen höheren Totwasseranteil besitzt. Die nutzbaren Feldkapazitäten sind in der Variante P bis in die Tiefe von 60 cm um 3 – 4 Vol.-% höher als in der Variante D.

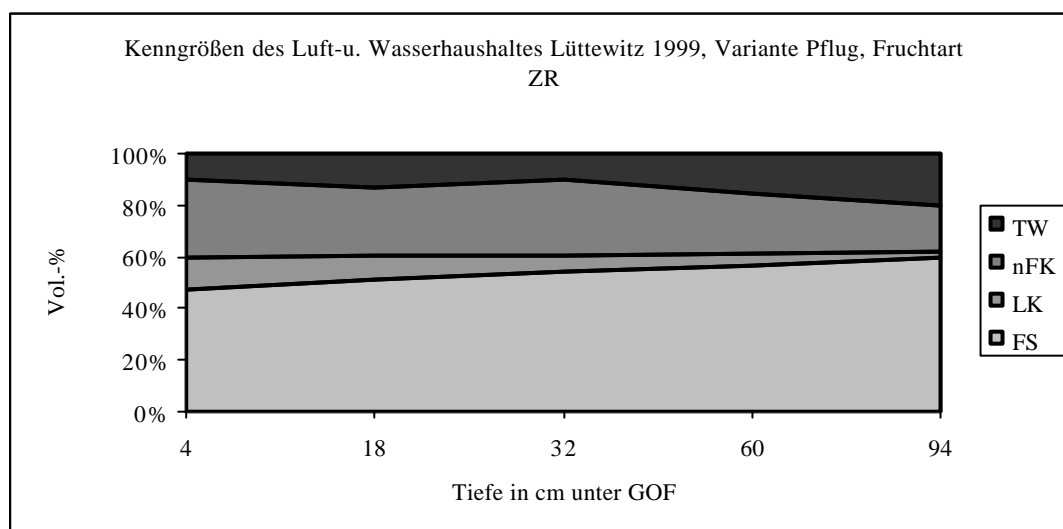


Abb. 11. Kenngrößen des Luft- und Wasserhaushaltes – Variante P 1999 (Quelle: LfL, eigene Darstellung).

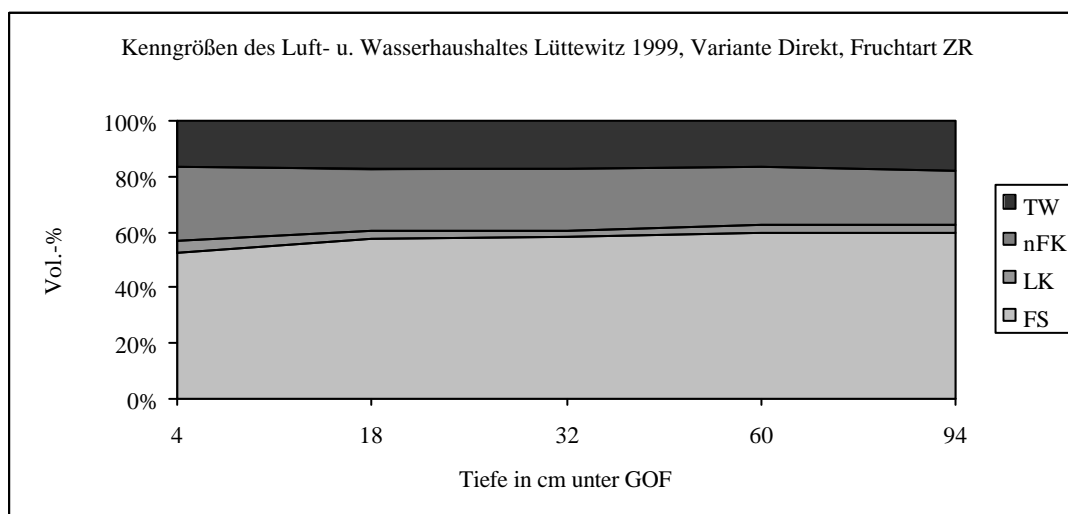


Abb. 12. Kenngrößen des Luft- und Wasserhaushaltes - Variante D 1999 (Quelle: LfL, eigene Darstellung).

Für die Variante K wurden im Gesamtprofil noch geringere Werte der nFK als in der Variante D ermittelt. Die Werte der nFK sind im Mittel 4 – 5 % geringer. Die Variante K wies 1999 die höchsten Werte der LK im Gesamtprofil auf. Die geringsten Werte der LK konnten in der Variante D ermittelt werden. Im Jahr 1999 liegen die Werte der LK der Variante P in 0 – 4 cm Tiefe nach KA 4 (1994) in der Klasse hoch. Bis in 60 cm Tiefe sind die LK als mittel einzuordnen. Nur im Bereich 90 – 94 cm liegen die Messwerte im Bereich gering. Die Werte der nFK liegen bis in 60 cm Tiefe im Bereich hoher nFK. In der Variante P war die LK in den Jahren 1999 und 2000 durch eine deutliche Abnahme nach unten gekennzeichnet (s. Abb. 11).

Die Entwicklung der Jahre 1999 - 2000 in der Variante D zeigte wie in der Variante P eine Erhöhung der LK und eine Verringerung der nFK. Die LK der Variante D lag im Jahr 1999 im Bereich gering, nur in 0 - 4 cm Tiefe wurden Werte des Bereiches mittel gemessen. Die nFK lag in der Variante D in beiden Jahren im Bereich mittel.

Die Variante P wies im Jahr 2000 im Gesamtprofil die geringsten Anteile an Bereichen des TW auf. Außerdem besaß die Variante P auch im Jahr 2000 die höchsten Anteile der nFK in allen Tiefen. Die höchsten Anteile LK wies die Variante KL im Gesamtprofil auf. Besonders hohe Werte konnten hier in der Tiefe 10 – 15 cm ermittelt werden. Geringe Werte der LK wurden im Jahr 2000 in den Varianten D und K ermittelt, wobei die Variante K die geringsten Werte aufwies.

Bodentemperatur

Die Bodentemperaturen wurden 1999 im wöchentlichen Rhythmus in den Tiefen 1 cm, 5 cm und 10 cm mit Einstichthermometern in den Varianten Pflug, Direkt und Konservierend gemessen. In der Abb. 13 sind die Ergebnisse exemplarisch für die Bodentiefe 5 cm dargestellt. In den Tiefen 1 cm und 10 cm sahen die Verhältnisse ähnlich aus.

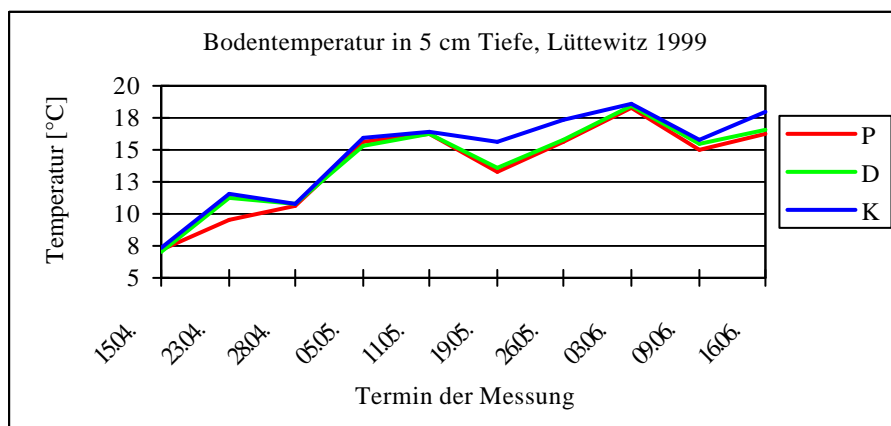


Abb. 13. Bodentemperatur in 5 cm Tiefe 1999 – Varianten P, D, L (Quelle: LfL).

In 5 cm Tiefe wurden im gesamten Zeitraum der Messung von April bis Juni in der Variante K die höchsten Temperaturen gemessen. Auch die Variante D wies von Mitte April bis Anfang Mai höhere Bodentemperaturen als die Variante P auf. Die Unterschiede liegen im Bereich um 2 °C. Von Anfang Mai bis zum Ende der Messperiode verliefen die Temperaturen in den Varianten D und P nahezu auf dem gleichen Niveau. Nur Anfang Juni bis Mitte Juni 1999 war der Boden der Variante D noch einmal 1 – 2 °C wärmer als in der Variante P. In den Tiefen 1 cm und 10 cm sind die Verläufe ähnlich. Nur in 1 cm Bodentiefe sind die Unterschiede mit bis zu 4 °C von Mitte Mai bis Mitte Juni zwischen den Varianten D und P stärker ausgeprägt. Die Änderungen der Lufttemperaturen können besonders in den oberen Bodentiefen nachvollzogen werden. In der Variante K wurden die geringsten Veränderungen im Temperaturverlauf ermittelt.

Wasser- und Luftleitfähigkeit

Die maximale Wasserinfiltrationsleistung eines Bodens kann durch die gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) ausgedrückt werden. In allen Bodentiefen wiesen die Varianten D, K, und KL wesentlich höhere Leitfähigkeiten als die Variante P bei extremer Streuung der Einzelwerte auf (LFL, 2001). Neben dem Matrixfluss ist der Makroporenfluss für die Höhe der Leitfähigkeit bestimmend. Unter Makroporen werden in der vorliegenden Arbeit kontinuierliche Poren nach einer Definition von BEVEN & GERMANN (1982) verstanden. Diese Poren müssen einen „nonequilibrium channeling flow“ erlauben.

Bei der Bestimmung der Luftleitfähigkeit wies die Variante P im arithmetischen Mittel in den Entwässerungsstufen pF 1,8 und pF 2,5 die höchsten kl-Werte in 20 cm Tiefe auf. In 40 cm Tiefe wurden in der Variante KL die höchsten kl-Werte in beiden Entwässerungsstufen ermittelt. Die Variante K wies in beiden Tiefen und in beiden Entwässerungsbereichen die geringsten kl-Werte auf. Bei der Betrachtung der geometrischen Mittel wurden für die Variante P die höchsten kl-Werte in beiden Tiefenstufen und Entwässerungsbereichen ermittelt.

5.2 Bodenchemische Ergebnisse

5.2.1 N_{min}-Gehalte der Bodenproben

Der N_{min}-Gehalt kennzeichnet den direkt pflanzenverfügbaren Stickstoffanteil im Boden. Nach VDLUFA (1991) ist durch die N_{min}-Beprobung eine Beratung zur Frühjahrsdüngung und eine Kontrollmaßnahme für die ordnungsgemäße Stickstoffdüngung gegeben.

Die Varianten P, D und K wurden über den gesamten Untersuchungszeitraum von 1999 bis 2001 beprobt. Die Variante KL wurde 1999 aus arbeitstechnischen Gründen nicht beprobt. Die ermittelten Nmin-Gehalte werden in allen Varianten nahezu ausschließlich vom Nitratgehalt geprägt.

Ergebnisse der Nmin-Untersuchung der Variante P

Die höchsten Nmin-Gehalte im Gesamtprofil wurden im Jahr 1999 gemessen (Abb. 14). Die Werte der Jahre 2000 und 2001 lagen auf ähnlichem Niveau. Die Nmin-Werte des Gesamtprofils waren von März bis Juni 1999 doppelt bis 3-fach so hoch wie die vergleichbaren Werte der Jahre 2000 und 2001. Im Jahr 1999 wurden Zuckerrüben angebaut. Die Aussaat fand am 10.04.1999 statt. Am 09.04.99 wurde die entsprechende Saatbettbereitung durchgeführt. In den Jahren 2000 und 2001 wurde jeweils Winterweizen angebaut. Dieser wurde im Jahr 2000 im Oktober gesät. Im Jahr 2001 geschah dies im September. Die Einsaat und die vorrausgehende Grundbodenbearbeitung und Saatbettbereitung spiegeln sich deutlich im Nmin-Gehalt dieser Monate wieder. Der Verlauf der Nmin-Gehalte in der Schicht 0 – 30 cm prägt am deutlichsten den Verlauf des Nmin-Gehaltes im Gesamtprofil 0 – 90 cm. Diese Schicht wird am stärksten von Bodenbearbeitungsmaßnahmen und Witterungsgeschehen beeinflusst. In den Monaten mit Bearbeitungsmaßnahmen machen die Gehalte der Bodenschicht 0 – 30 cm etwa 50 – 75 % des Gesamtgehaltes aus.

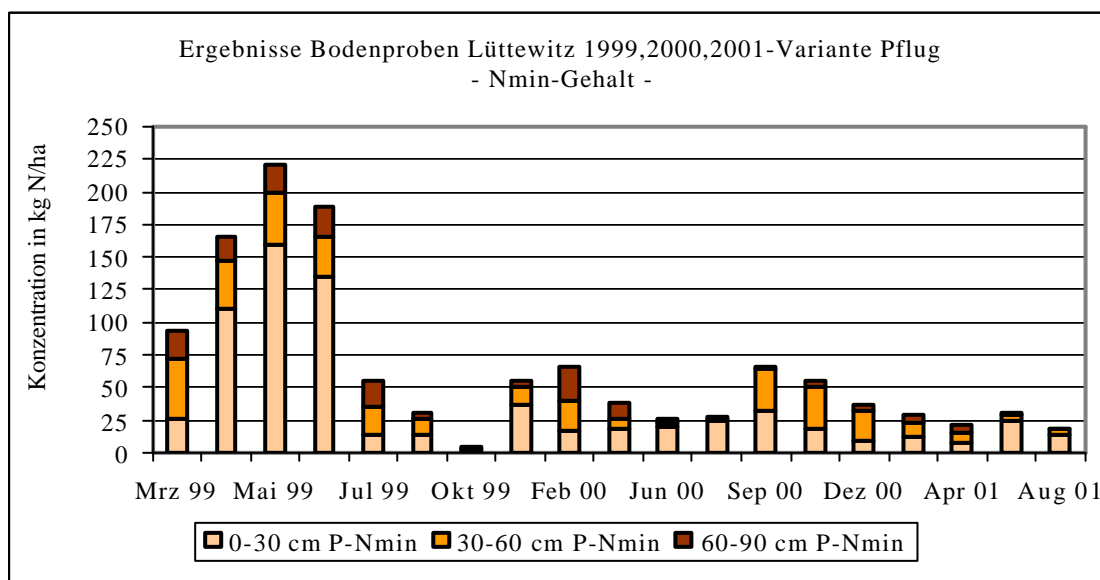


Abb.14. Nmin-Gehalte der Bodenproben der Variante P.

Nach der Ernte der Zuckerrüben lag im Oktober 1999 ein sehr geringes N-min-Niveau vor. Dieser Wert wurde durch die anschließende Bodenbearbeitung zum Winterweizen 2000 ver-

vierfacht. Im Jahr 2000 bewirkte diese Bodenbearbeitung zum Winterweizen 2001 eine Verdoppelung des Nmin-Gehaltes im Gesamtprofil.

Ergebnisse der Nmin-Untersuchung der Variante D

Die ermittelten Nmin-Gehalte sind in der Abb. 15 dargestellt. Es wurde erkennbar, dass die Höhe der Nmin-Gehaltes deutlich von den Einflüssen der Düngung und Aussaat geprägt ist.

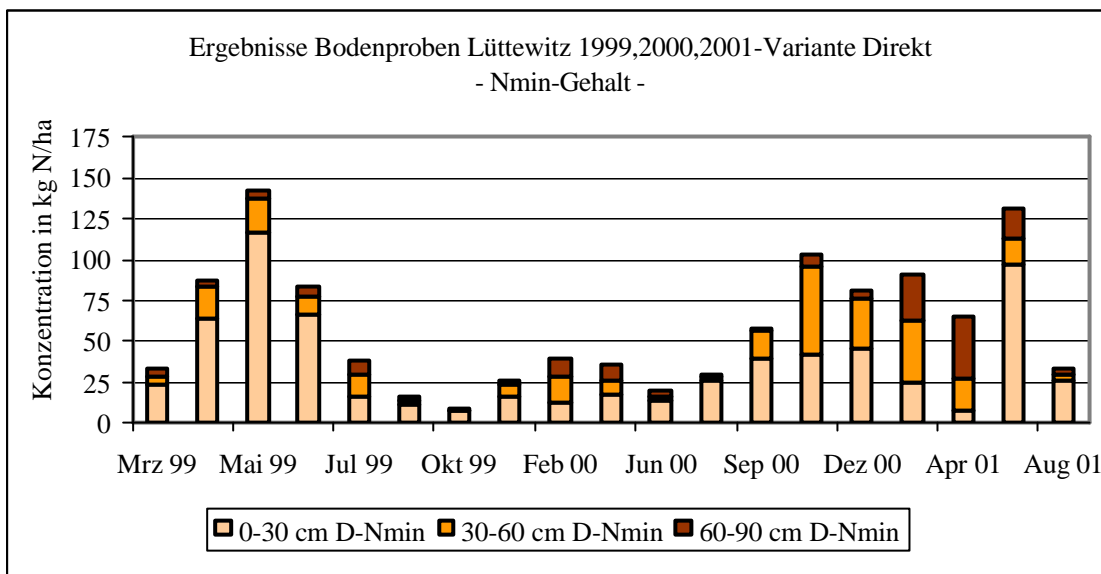


Abb.15. Nmin-Gehalte der Bodenproben der Variante D.

Während des Anbaus von Zuckerrüben im Jahr 1999 tritt der punktuell höchste Nmin-Gehalt auf. In der im Vergleich zum Winterweizen kürzeren Vegetationsperiode baut sich schnell ein hoher Nmin-Gehalt auf, aber ebenso schnell wieder ab. Die geringsten Nmin-Gehalte im Gesamtprofil sind von Oktober 1999 bis zum August 2000, in der Anbauperiode des Winterweizens 2000, zu erkennen. Im Anbaujahr 2001 sind die Nmin-Gehalte relativ gleichmäßig über die gesamte Periode verteilt. Der Nmin-Gehalt des Gesamtprofils ist deutlich durch die Werte der Schicht 0 – 30 cm geprägt, welcher 50 – 75 % des Gesamtgehaltes ausmacht.

Ergebnisse der Nmin-Untersuchung der Variante K

In der Abb. 16 sind die Ergebnisse der Nmin-Untersuchungen im gesamten Untersuchungszeitraum für die Variante K dargestellt. Es ist erkennbar, dass im Jahr 1999 die höchsten Nmin-Gehalte auftraten. Diese sind in den entsprechenden Monaten doppelt bis 3-fach so hoch wie die Werte in den Jahren 2000 und 2001. Die Hauptanteile am Gesamtgehalt machen auch hier die Anteile der Messtiefe 0 - 30 cm aus. In den Monaten März bis Juni 1999, sowie Juni bis September 2000 betragen die Anteile der obersten 30 cm 50 bis 75 %. In den Jahren 2000 und 2001 sind die Gesamtgehalte an mineralischem Stickstoff relativ gleichmäßig auf

die einzelnen beprobten Bodentiefen verteilt. Wie in den Variante P und KL können die ansteigenden Nmin-Gehalte auf Bodenbearbeitungs- und Düngungsmaßnahmen (Tab. A 3) zurückgeführt werden.

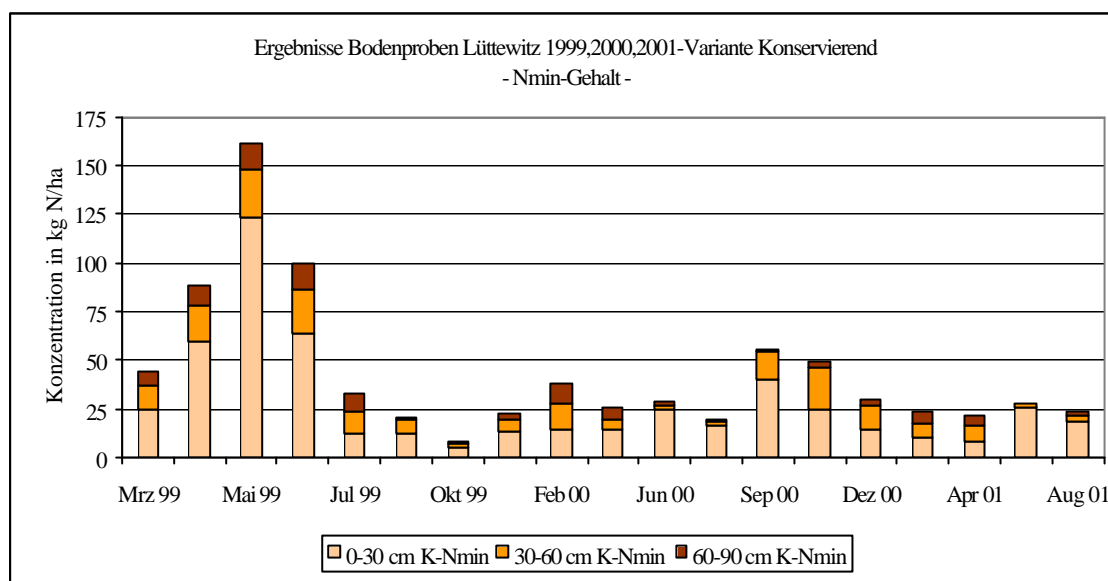


Abb. 16. Nmin-Gehalte der Bodenproben der Variante K.

Ergebnisse der Nmin-Untersuchung der Variante KL

In der Abb. 17 sind die Ergebnisse der Nmin-Untersuchungen im gesamten Untersuchungszeitraum für die Variante KL dargestellt.

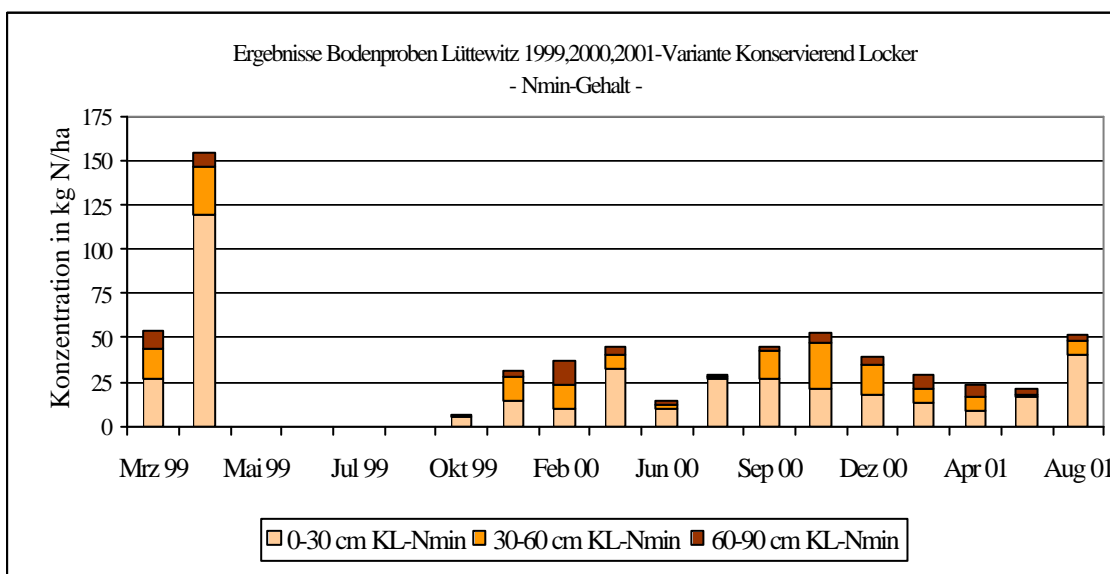


Abb. 17. Nmin-Gehalte der Bodenproben der Variante KL.

Wie in den anderen Varianten ist, erkennbar, dass im April 1999 durch die Aussaat und teilweise Bodenbearbeitung zu Zuckerrüben die höchsten Nmin-Gehalte auftraten. In den Jahren 2000 und 2001 lagen die Nmin-Gehalte im Untersuchungszeitraum auf einem relativ homo-

genen Niveau. Die Bodenbearbeitungs- und Düngungsmaßnahmen sind durch Erhöhungen der Nmin-Gehalte nachvollziehbar. Die höchsten Nmin-Gehalte innerhalb des Gesamtprofils traten in der Schicht 0 - 30 cm auf.

Nmin-Gehalte der Bodenbearbeitungsvarianten im Vergleich

In Abb. 18 sind die ermittelten Nmin-Gehalte der Bodenbearbeitungsvarianten P, D, K und KL im Gesamtprofil vergleichend für den gesamten Untersuchungszeitraum dargestellt.

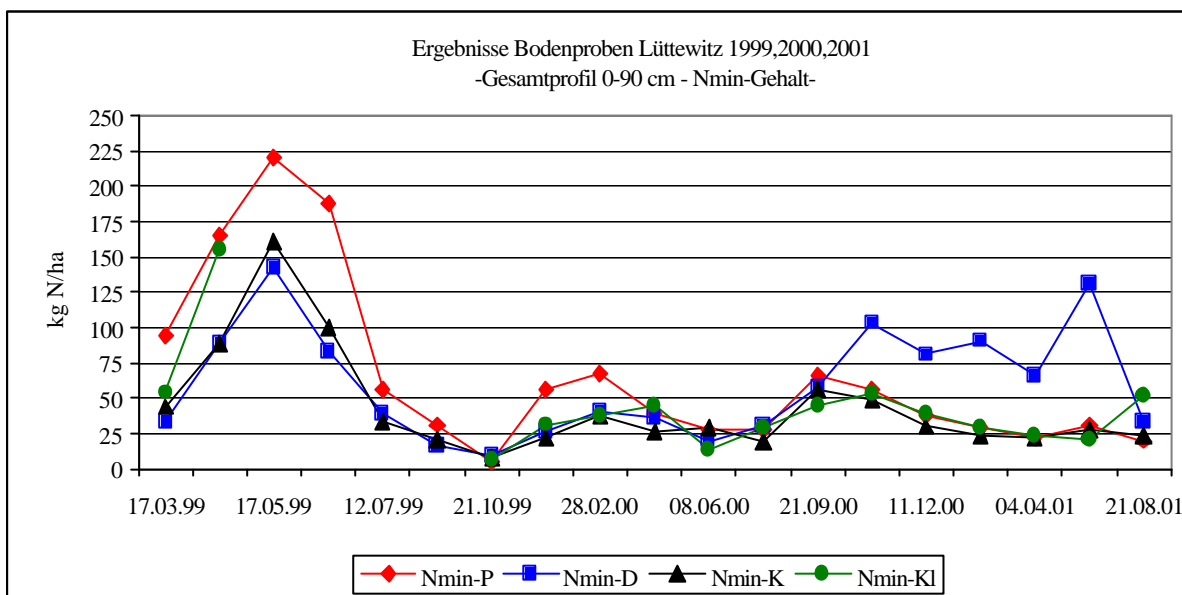


Abb. 18. Vergleich der Nmin-Gehalte im Gesamtprofil (Nmin-Gehalte der 4 Bodenbearbeitungssysteme im Untersuchungszeitraum).

Bei der Betrachtung der Nmin-Gehalte des Gesamtprofils 0 – 90 cm im Verlauf der 3 Jahre wird erkennbar, dass die Variante P die höchsten Nmin-Gehalte im Jahr 1999 aufwies. Die Werte der Variante P waren im April, Mai und Juni 1999 um ca. 80 kg N/ha höher als in den Varianten D und K (Abb. 18). Das starke Abfallen des Nmin-Gehaltes im Juli 1999 ist durch den Entzug der Kulturpflanzen und durch die sehr hohen Juni- und Juliniederschläge begründet. In allen Varianten stiegen in diesem Zeitraum die Wassergehalte besonders in den tieferen Zonen auf Werte im Bereich der FK. Dies führte wahrscheinlich aufgrund von mangelnder Belüftung zu einer Verminderung der Mineralisation. Im Jahr 2000 waren die Nmin-Gehalte in der Variante P von Beginn des Jahres bis Ende März höher als in allen anderen Varianten. Die Unterschiede betragen ca. 25 kg N/ha. Im Jahr 2001 waren die Nmin-Gehalte im Gesamtprofil der Variante P ähnlich denen anderen Varianten.

Es zeigt sich eine deutliche Zunahme der Nmin-Gehalte nach den Bearbeitungsterminen und einen Abfall in der anschließenden Vegetationsperiode (Abb. 18). Im Anbaujahr 2001 sind in der Variante D um 40 – 100 kg N/ha erhöhte Werte im Vergleich zu den anderen Varianten

erkennbar. Die hohen Nmin-Gehalte des Jahres 2001 sind fast ausschließlich durch den Nitratgehalt geprägt. Aus der Schlagkartei wird erkennbar, dass im Jahr 2001 in allen Varianten ca. 15 kg N/ha mehr als beim Anbau des Winterweizens im Vorjahr gedüngt wurden. Im November 2000 fand in der Variante D eine Nachsaat von Winterweizen wegen des schlechten Feldaufgangs statt.

Die Nmin-Gehalte der Variante K bewegen sich in allen 3 Jahren im Mittel der Varianten. Ebenso wie die Variante D lag die Variante K im Jahr 1999 deutlich unter der Variante P. Dies trifft ebenfalls auf das Frühjahr 2000 zu. Auch die Nmin-Gehalte der Variante KL lagen innerhalb des gesamten Untersuchungszeitraumes im Mittel der Varianten. Es können Anstiege der Gesamtgehalte nach Bearbeitungs- und Düngungsmaßnahmen ausgemacht werden.

Die Kurven der Ebenen 0 - 30 cm, 30 - 60 cm und 60 - 90 cm verlaufen ähnlich der jeweiligen Kurve für das Gesamtprofil. In den unteren Tiefen treten die Mineralisationsschübe zeitlich versetzt und unterschiedlich stark auf. Die Nmin-Gehalte der 3 Ebenen sind vergleichend in den Abb. A 2 bis Abb. A 4 im Anhang dargestellt.

Im Jahr 1999 lagen die Nmin-Werte der Variante P in der Krume mit ca. 50 kg N/ha über denen der Varianten D und K. Im April 1999 wiesen die Varianten KL und P (Abb. A 2) die höchsten Nmin-Gehalte der Tiefe 0 - 30 cm auf. Die Nmin-Werte der Variante P waren in den obersten 30 cm nach vorheriger Bodenbearbeitung im November 1999 etwa 15 kg N/ha höher als in den anderen Varianten. Auch die Kurve der Variante D in der Tiefe 0 - 30 cm folgt der Kurve des Gesamtverlaufs und zeigt im Jahr 2001 die stark erhöhten Nmin-Gehalte.

Die Kurven der Nmin-Gehalte in der Tiefe 30 - 60 cm können in der Abb. A 3 betrachtet werden. Es zeigt sich in allen Varianten ein ähnlicher Kurvenverlauf wie im Gesamtprofil, wobei deutlich wird, dass die Mineralisationsschübe zeitlich versetzt eintreten. Es sei auf einen hohen Nmin-Ausgangswert in der Variante P in 30 - 60 cm Tiefe zu Beginn der Messungen im März verwiesen, welcher in 0 - 30 cm Tiefe in dieser Form nicht zu finden war. Auch in der Tiefe 60 - 90 cm (Abb. A 4) sind die Kurvenverläufe ähnlich zu den Verläufen der Nmin-Werte im Gesamtprofil. Die Unterschiede zwischen den Varianten sind nicht mehr so stark ausgeprägt. Im Jahr 1999 lagen die Nmin-Gehalte der Variante P in den Monaten März bis Juli bis mit ca. 15 kg N/ha über denen der anderen Varianten. Deutlich sind in allen Varianten die durch Düngung verursachten Mineralisationsschübe zu erkennen, welche auch hier

zeitlich verzögert und unterschiedlich stark einsetzen. Die Nmin-Gehalte werden in allen Varianten zu ca. 90 – 95 % vom Nitratgehalt geprägt.

Nitrat-Gehalte der Tiefe 60 – 90 cm im Vergleich

Die Ergebnisse der Tiefe 60 – 90 cm sind besonders interessant, da die hier gemessenen Nitratgehalte ein Austragspotenzial darstellen. Der Nitrat-Gehalt, welcher hier ermittelt wurde, kann besonders über die Wintermonate und bei fehlender zehrender Kultur, dem Austrag unterliegen. Die Ergebnisse sind in Abb. 19 dargestellt. Es wurden geringere Gehalte im Vergleich zu den Tiefen 0 - 30 cm und 30 – 60 cm (Daten nicht dargestellt) zu erkennen.

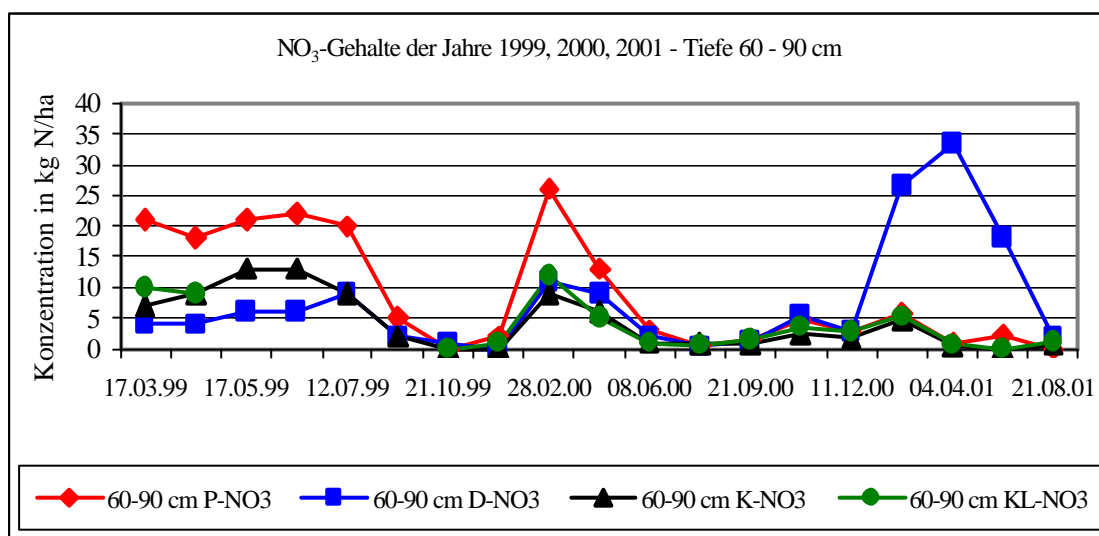


Abb. 19. Nitratgehalte in der Tiefe 60 – 90 cm (Nitratgehalte aller Varianten im Untersuchungszeitraum).

Im Jahr 1999 und von Anfang des Jahres bis Juni 2000 waren die Nitratgehalte der Variante P in dieser Tiefe höher als in den anderen Varianten. Im Jahr 2001 waren keine Unterschiede zu den anderen Varianten erkennbar. Auch in der Variante D ist ein ähnliches Bild wie in den Tiefen 0 - 30 cm und 30 - 60 cm zu erkennen. Im Jahr 2001 wies die Variante D ca. 20 kg N/ha höhere NO₃-Gehalte als die anderen Varianten auf. Die Varianten P, K und KL verliefen im Jahr 2001 etwa auf einem Niveau .

Die Werte der ermittelten Ammoniumgehalte erreichten im gesamten Untersuchungszeitraum in allen Varianten nur geringe Größenordnungen. Im Verlauf der 3 Untersuchungsjahre lagen die NH₄-Gehalte in allen Tiefenstufen größtenteils unter 5 kg N/ha. Nur im November 1999 und April 2001 konnten höhere Gehalte in allen Varianten ermittelt werden. Innerhalb der erhöhten Nmin-Werte der Variante D im Jahr 2001 waren keine Erhöhungen der NH₄-Anteile zu erkennen (Daten nicht dargestellt).

Verteilung der Nitrat-Gehalte und Ammoniumgehalte

Von März 1999 bis in den September 1999 wurden kaum NH_4 -Anteile am N_{min} -Gehalt in allen Varianten und allen Tiefenstufen ermittelt. In den Jahren 2000 und 2001 konnten durchgehend NH_4 -Gehalte in allen Bodentiefen und Varianten erfasst werden. In der Tiefe 0 - 30 cm besaß die Variante P die höchsten NH_4 -Anteile am N_{min} -Gehalte im gesamten Untersuchungszeitraum. Den geringsten NH_4 -Anteil dieser Tiefenstufe besaß die Variante K. In der Tiefe 30 - 60 cm und 60 - 90 cm besaß die Variante P die geringsten NH_4 -Anteile. Die Variante K wies in 60 - 90 cm den höchsten NH_4 -Anteil auf. Die anderen Varianten lagen im Mittel.

Veränderungen der NO_3 -Gehalte über die Winterperioden

Die Bewertung der Bodenbearbeitungsvarianten hinsichtlich eines N-Austrages über die Winter- bis in die Frühjahrsperiode erfolgte anhand der Veränderungen der NO_3 -Gehalte der Bodenproben in den einzelnen Tiefen, da keine Beprobungen der Bodenlösungen über den winterlichen Zeitraum vorlagen. Für diese Bewertung sind in den Abb. 20, Abb. 21 sowie Abb. A 5 und Abb. A 6 die NO_3 -Gehalte der Bodenbearbeitungsvarianten im relevanten Zeitraum zusammengefasst.

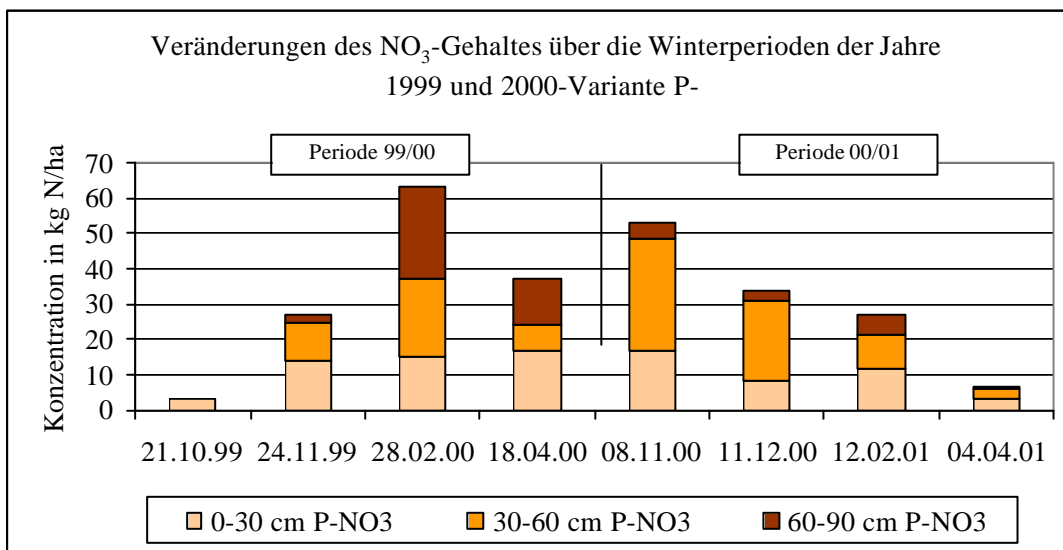


Abb. 20. Veränderungen des NO_3 -Gehaltes der Bodenproben über die Winterperioden 1999 und 2000 in der Variante P.

In der Variante P konnte ein deutlicher Rückgang des NO_3 -Gehaltes zwischen Februar und April 2000 aus den Tiefen 30 - 60 cm und 60 - 90 cm festgestellt werden.

Bei dem Austrag handelt es sich um jeweils ca. 15 kg N/ha in jeder Bodenschicht. In der Winterperiode des Jahres 2000 konnte ein Rückgang zwischen November und Dezember aus allen 3 Bodentiefen festgestellt werden. In den Schichten 0 - 30 cm und 30 - 60 cm waren Änderungen von ca. 9 kg N/ha erkennbar. In der Tiefe 60 - 90 cm erfolgte in diesem Zeitraum ein Rückgang des NO_3 -Gehaltes von ca. 2 kg N/ha. Von Dezember 2000 bis Februar 2001 konnte eine Verlagerung von Nitrat aus der Schicht 30 - 60 cm in die Schicht 60 - 90 cm festgestellt werden. Ein deutlicher Rückgang war zwischen Februar und April 2001 erkennbar (Abb. 20). Die Verringerung des Nitrat-Gehaltes betraf hier alle 3 Messtiefen. In der Tiefe 0 - 30 cm kann von Pflanzenentzug ausgegangen werden. In der Tiefe 60-90 cm konnte ein Austrag von ca. 5 kg N/ha möglich sein. Insgesamt wurden in den beiden Winterperioden nach Berechnungen aus den NO_3 -Gehalten ca. 23,9 kg N/ha aus der Tiefe 60 - 90 cm verlagert. Mit diesem Wert liegt die Variante P weit vor den anderen Varianten.

In der Variante D (Abb. 21) konnte ein geringer Rückgang von ca. 1 kg N/ha zwischen Oktober und November 1999 aus der Tiefe 0 - 30 cm festgestellt werden. Weiterhin war ein Rückgang des NO_3 -Gehaltes in den Schichten 30 - 60 cm und 60 - 90 cm zwischen Februar und April 2000 erkennbar. Dieser Rückgang lag in der Schicht 60 - 90 cm bei ca. 2 kg N/ha.

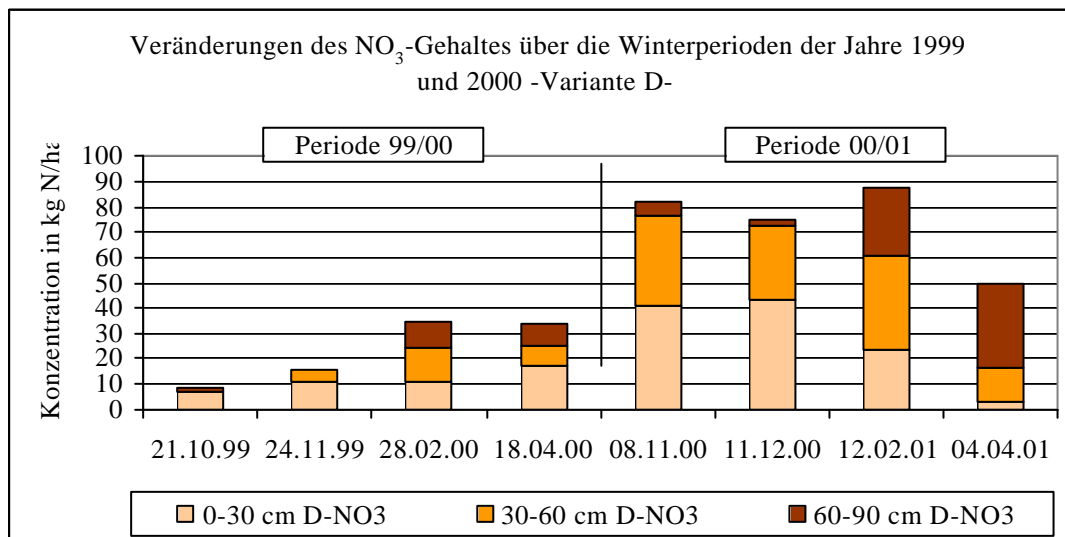


Abb. 21. Veränderungen des NO_3 -Gehaltes der Bodenproben über die Winterperioden 1999 und 2000 in der Variante D.

Im Herbst des Jahres 2000 konnte ebenfalls eine geringere Verringerung des NO_3 -Gehaltes in den beiden tieferen Messzonen ermittelt werden. Die Verringerung lag hier bei ca. 2,6 kg N/ha und damit höher als in vergleichbarer Tiefe der anderen Varianten. Eine Verringerung

des Nitrat-Gehaltes im Gesamtprofil konnte in der Variante D zwischen Februar und April 2001 erkannt werden (Abb. 21). Hier erfolgte die Verringerung in den Tiefen 0 - 30 cm und 30 - 60 cm, womit nicht von einem Austrag aus dem Profil gesprochen werden kann. Insgesamt konnten in der Variante D in beiden Winterperioden ca. 5,6 kg N/ha aus der Tiefe 60 - 90 cm ausgetragen werden. Hiermit wies diese Variante nur 23 % des möglichen Austrages der Variante P auf und damit den geringsten Wert im Vergleich der Varianten auf.

Die Veränderungen der Nitrat-Gehalte der Varianten K und KL über die Winterperioden sind in den Abb. A 5 und Abb. A 6 dargestellt. In der Variante K konnte zwischen Februar und April 2000 eine Verringerung des NO_3 -Gehaltes aus den Tiefen 30 - 60 cm und 60 - 90 cm festgestellt werden. Insgesamt muss für alle Varianten gültig festgehalten werden, dass in dem Zeitraum Februar bis April wahrscheinlich noch keine relevanten NO_3 -Entzüge durch den angebauten Winterweizen in den Jahren 2000 und 2001 in den tieferen Bodenzonen stattfanden. Die Verringerung im April 2000 betrug in der Variante K (Abb. A 5) ca. 3 kg N/ha aus der Tiefe 60 - 90 cm. Im Dezember des Jahres 2000 konnte eine Verringerung des NO_3 -Gehaltes im Gesamtprofil im Vergleich zum November ermittelt werden. Diese Verringerung betraf vorrangig die Schichten 0 - 30 cm und 30 - 60 cm. Der mögliche Austrag aus der Tiefe 60 - 90 cm betrug weniger als 1 kg N/ha. Zwischen Februar und April 2001 konnte ein deutlicher Rückgang des NO_3 -Gehaltes in den Tiefen 30 - 60 cm und 60 - 90 cm festgestellt werden. Dieser betrug ca. 5 kg N/ha für die Tiefe 60 - 90 cm. Die Verringerung des NO_3 -Gehaltes in der Tiefe 0 - 30 cm kann hier durch Pflanzenentzug erklärt werden. Insgesamt konnte in den Winterperioden für die Variante K ein möglicher Austrag von ca. 13,4 kg N/ha aus der Tiefe 60 - 90 cm ermittelt werden.

Aus der Abb. A 6 kann erkannt werden, dass in der Variante KL zwischen Februar und April 2000 eine NO_3 -Verringerung in den Tiefen 30 - 60 cm und 60 - 90 cm stattfand. Insgesamt konnte im April 2000 eine Zunahme des NO_3 -Gehaltes verzeichnet werden, was durch eine Erhöhung des NO_3 -Gehaltes in der Tiefe 0 - 30 cm verursacht wurde. Der Rückgang von Februar bis April 2000 betrug in der Tiefe 60 - 90 cm ca. 7 kg N/ha. Eine Verringerung in allen Tiefen konnte zwischen November und Dezember 2000 festgestellt werden. Dieser betrug in diesem Zeitraum weniger als 1 kg N/ha in der Tiefe 60 - 90 cm. Von Dezember 2000 bis Februar 2001 wurde in der Variante KL ein Rückgang des NO_3 -Gehaltes ermittelt, welcher vorrangig die Schichten 0 - 30 cm und 30 - 60 cm betraf (Abb. A 6). Eine Verringerung war in allen Tiefen zwischen Februar und April 2001 zu erkennen, wobei die Verringerung ca. 5 kg N/ha in der Tiefe 60-90 cm betrug. Insgesamt konnten in der Variante KL in den Win-

terperioden der Jahre 1999 und 2000 ca. 17,1 kg N/ha aus der Tiefe 60 - 90 cm ausgetragen werden. Die Variante P wies ein Austragspotenzial von ca. 23,9 kg N/ha auf.

5.2.2 N_{\min} -Gehalte der Bodenlösung

Die Probenahme der Bodenlösung erfolgte über Keramik-Saugkerzen an stationären Messplätzen in 90 cm Tiefe. Zur Lage der stationären Messplätze sei auf die Abb. 6 verwiesen.

N_{\min} -Gehalte in der Bodenlösung der Variante P

In den Abb. 22 und Abb. 23 sind die gemessenen N_{\min} -Gehalte in den Bodenlösungen und deren Aufteilung exemplarisch für die Varianten P und K innerhalb des Untersuchungszeitraumes der Jahre 2000 und 2001 dargestellt.

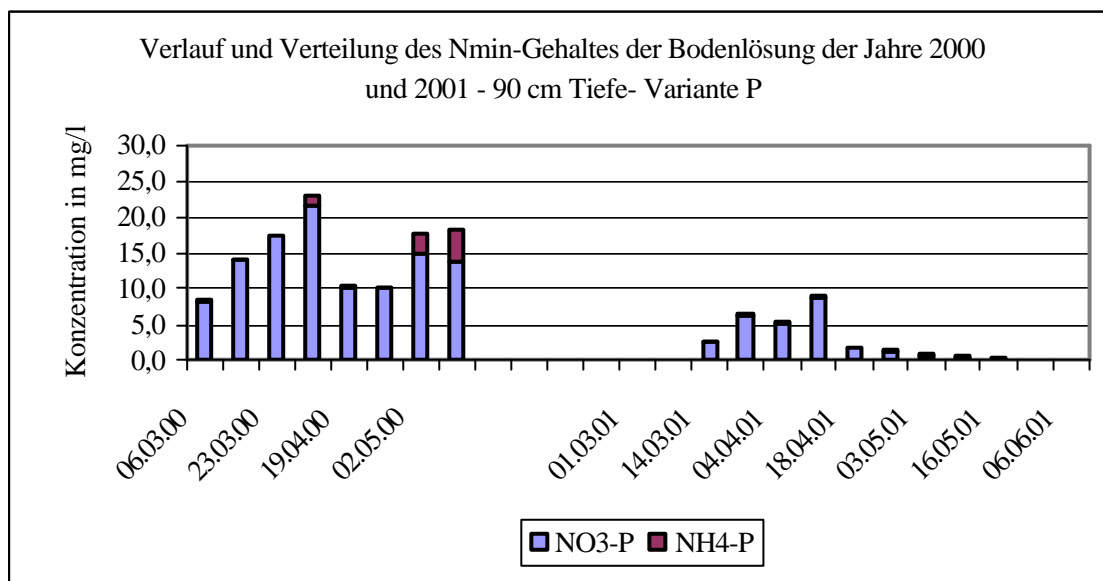


Abb. 22. N_{\min} -Gehalte der Bodenlösung der Variante P (Darstellung der Frühjahrsperioden).

Der gemessene Nitratgehalt und der Ammoniumgehalt stellen zusammen den mineralischen Stickstoffanteil (N_{\min}) in der Bodenlösung dar. Er wird in der Bodenlösung in der Konzentration mg/l angegeben. Eine Umrechnung in die Konzentration kg N/ha ist nicht zulässig, da der Einzugsbereich einer Saugkerze aufgrund der Heterogenität von Böden nicht genau definiert werden kann.

Aus der Abb. 22 wird erkennbar, dass im Jahr 2000 die höchsten N_{\min} -Gehalte im Untersuchungszeitraum ermittelt wurden. Diese Werte sind doppelt so hoch wie die vergleichbaren Werte des Jahres 2001. Es ist ein deutlicher Anstieg des N_{\min} -Gehaltes zu den Messterminen

am 14.04. und 19.04. zu erkennen. In diesen Gehalten spiegelt sich auch eine am 07.04. 2000 durchgeführte N-Düngung wieder (s. Tab. A 1). Der Höchstgehalt an Nmin in der Bodenlösung wurde erst am 19.04.00 erreicht. Am 29.04.00 wurde ebenfalls eine N-Düngung durchgeführt. Diese war wiederum zeitlich versetzt am 02.05. und 11.05.00 durch erhöhte Nmin-Gehalte in der Bodenlösung nachvollziehbar. Nur zu diesen Terminen wurden NH_4 -Gehalte in der Bodenlösung ermittelt. Insgesamt wurden nur sehr geringe NH_4 -Gehalte in den Bodenlösungen im gesamten Untersuchungszeitraum gemessen. Im Jahr 2001 konnte die N-Düngung vom 05.04.01 durch eine Erhöhung des Nmin-Gehaltes am 11.04.01 wahrgenommen werden. Nach diesem Messtermin erfolgte ein starker Abfall des Nmin-Gehaltes, welcher sich auch nicht nach 3 weiteren Düngungsterminen erhöhte. Höhere Nmin-Gehalte im Jahr 2000 und niedrigere Gehalte im Jahr 2001 wurden ebenfalls in den Bodenlösungen der Varianten K und KL ermittelt. Die Variante D zeigte ein entgegengesetztes Bild.

Nmin-Gehalte in der Bodenlösung der Variante D

In der Variante D traten die höchsten Nmin-Gehalte in der Bodenlösung im Jahr 2001 auf. Die Werte der Bodenlösungen des Jahres 2001 waren durchschnittlich doppelt so hoch wie die Nmin-Werte des Jahres 2000. Insgesamt lagen die gemessenen Nmin-Gehalte innerhalb des Messzeitraumes im Jahr 2000 auf einem relativ ähnlichem Niveau. Ein nicht so homogenes Bild zeigen die Werte des Jahres 2001. Hier erfolgte eine Zunahme des Nmin-Gehaltes um ca. 20 mg/l in der zweiten Hälfte der Messperiode. Eine starke Zunahme des Nmin-Gehaltes erfolgte am 25.04.01. Zu diesem Messtermin wurde auch der höchste Nmin-Wert im Untersuchungszeitraum erreicht. Dies kann durch eine N-Düngung am 20.04.01 begründet sein. Die hohen Gehalte der Messungen im Mai und Juni 2001 können auf Düngungsmaßnahmen am 27.04. und 30.05.01 zurückgeführt werden. Die Düngungstermine im April 2000 (Tab. A 2) sind im Vergleich zu den hohen Werten des Jahres 2001 nur schwach wahrnehmbar. Die Variante D besaß im gesamten Untersuchungszeitraum unter den untersuchten Bearbeitungsvarianten die geringsten NH_4 -Anteile am Nmin-Gehalt der Bodenlösungen

Nmin-Gehalt in der Bodenlösung der Variante K

In der Abb. 23 sind die gemessenen Nmin-Gehalte und deren Aufteilung in der Variante K innerhalb des Untersuchungszeitraumes der Jahre 2000 und 2001 dargestellt. Aus der Abbildung der ermittelten Nmin-Gehalte wird erkennbar, dass in der Variante K ebenso wie in der Variante P die höchsten Nmin-Gehalte im Jahr 2000 auftreten. Die Nmin-Gehalte der Bodenlösungen in der Variante K lagen im Jahr 2000 in der Messperiode durchschnittlich doppelt so hoch wie im Jahr 2001. In beiden Untersuchungsjahren wurden NH_4 -Gehalte ermittelt. Die

gemessenen NH_4 -Anteile machen ca. 20 % des N_{min} -Gehaltes aus. Stellenweise sind NH_4 -Anteile bis 50 % ersichtlich (Abb. 23). Die Düngung am 07.04.00 bewirkte wahrscheinlich die erhöhten N_{min} -Gehalte am 14.04. und 19.04.00. Wie auch in der Variante P wurde zeitlich versetzt der höchste N_{min} -Gehalt in der Bodenlösung erst 2 Wochen nach dem Düngungstermin gemessen. Zu diesem Termin wurden auch in beiden Varianten erhöhte NH_4 -Anteile ermittelt.

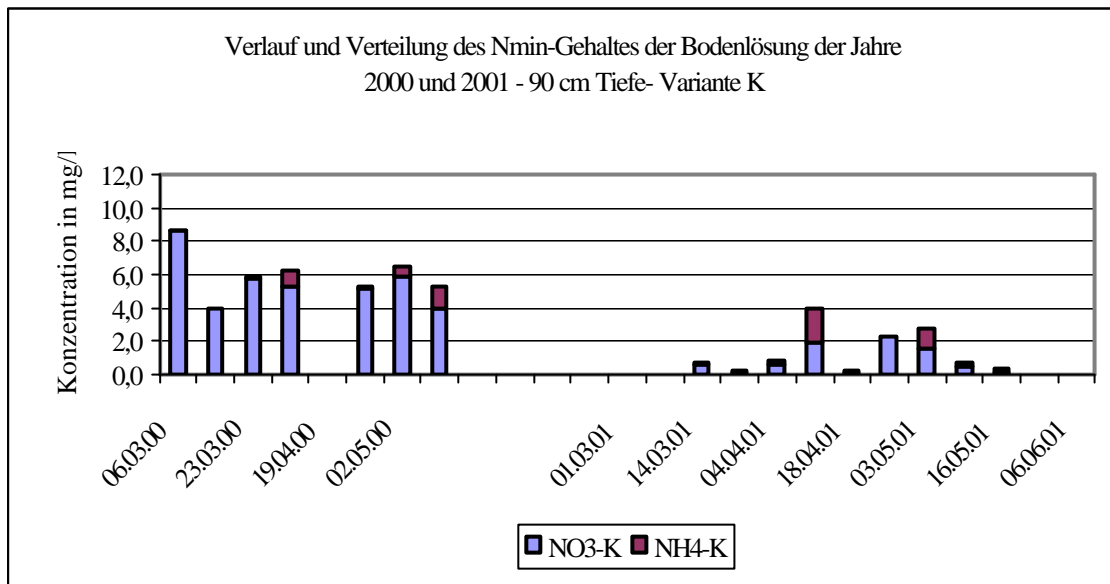


Abb. 23. N_{min} -Gehalt der Bodenlösung der Variante K (Darstellung der Frühjahrsperioden).

Der Düngungstermin am 29.04.00 (s. Tab. A 3) war in der Variante K durch eine Zunahme der N_{min} -Gehalte zu den Messterminen im Mai 2000 nachvollziehbar. Höhere NH_4 -Anteile traten auch hier erst ca. 2 Wochen später auf. Der höchste N_{min} -Wert wurde am 06.03.00 erreicht. In der Variante K traten in beiden Untersuchungs Jahren geringe Schwankungen der N_{min} -Gehalte im Bereich von 2 – 4 mg/l zwischen den einzelnen Messterminen auf. Höhere Variationen innerhalb der Messreihe eines Jahres waren dagegen im Jahr 1999 in der Variante P (Abb. 22) und im Jahr 2000 in der Variante D auf. Im Jahr 2001 waren die N-Düngungstermine am 05.04., 20.04. und 27.04. durch eine Zunahme des N_{min} -Gehaltes an den darauf folgenden Messterminen nachvollziehbar.

N_{min} -Gehalte in der Bodenlösung der Variante KL

In der Variante KL traten wie in den Varianten P und K im Jahr 2000 die höheren N_{min} -Gehalte im Untersuchungszeitraum auf. Die Werte des Jahres 2000 waren im Durchschnitt mindestens doppelt so hoch wie die vergleichbaren Werte des Jahres 2001 (Abb. A 6). In beiden Untersuchungsjahren wurden NH_4 -Anteile ermittelt. Im Jahr 2000 lagen die NH_4 -Anteile bei durchschnittlich 10 %. Im Jahr 2001 waren bei geringeren N_{min} -Gehalten auch NH_4 -

Anteile von 50 % und mehr möglich. Die einzelnen Erhöhungen der Nmin-Gehalte im Jahr 2001 spiegeln die Düngungstermine (Tab. A 4) wieder. Im Jahr 2001 lag ein relativ homogener Nmin-Gehalt vor.

NO₃-Gehalte der Bodenlösungen im Vergleich

Die ermittelten Nitratgehalte in den Bodenlösungen aus 90 cm Tiefe sind in der Abb. 24 vergleichend dargestellt. Zur Einschätzung wurden Gefährdungsklassen verwendet.

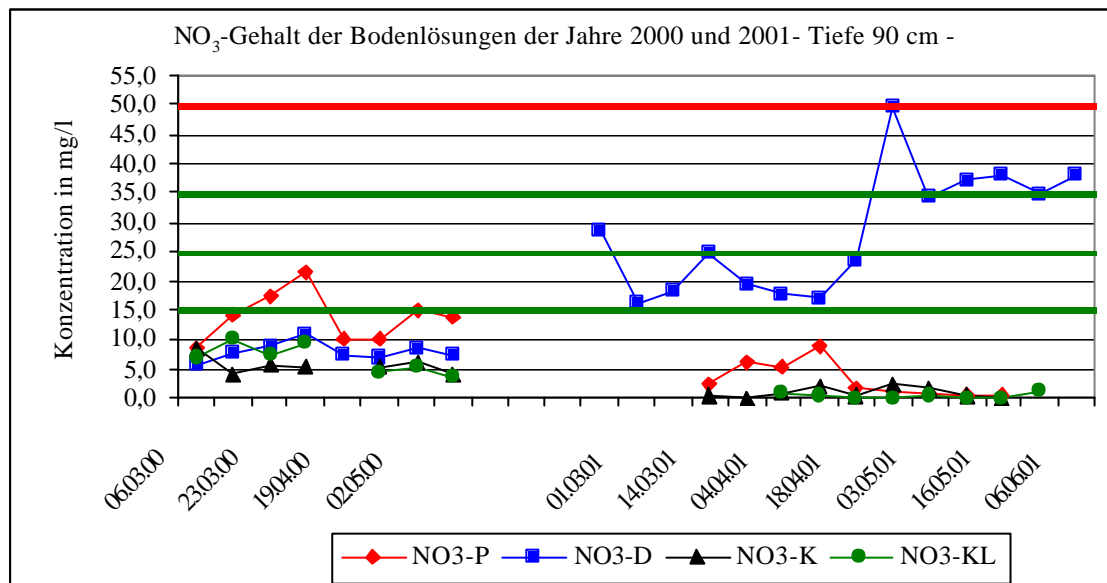


Abb. 24. Nitratgehalte der Bodenlösungen im Vergleich (Kennzeichnung von Gefährdungsklassen, siehe Text).

Da die Nmin-Gehalte der Bodenlösungen in allen Varianten hauptsächlich durch den Nitrat-Anteil geprägt sind, wurde auf eine vergleichende Darstellung der Nmin-Gehalte verzichtet. Größere Abweichungen der Kurven aufgrund der NH₄-Gehalte waren nicht zu erkennen. Die im Diagramm dargestellten farbigen Linien kennzeichnen unterschiedliche Konzentrationsbereiche, welche der Bewertung der ermittelten Gehalte dienen. In der Tab. 4 sind die verwendeten Gefährdungsklassen nach FREDE & DABBERT (1998) dargestellt.

Tab. 4. Gewässergefährdungspotenzial anhand der potenziellen Nitratkonzentration im Sickerwasser nach FREDE & DABBERT (1998).

Gefährdungsklasse	Nitrat im Sickerwasser in mg/l
sehr gering	< 15
gering	15 bis < 25
mittel	25 bis < 35
hoch	35 bis < 50
sehr hoch	> 50

Bei der Betrachtung der Nitratgehalte (Abb. 24) im Jahr 2000 ist erkennbar, dass die Varianten K und KL die geringsten Werte aufwiesen. Die Werte dieser Varianten lagen innerhalb des Messzeitraumes 2000 mit Gehalten von unter 10 mg NO_3^-/l in der Gefährdungsklasse sehr gering. Zu Beginn der Messungen im März lagen die Werte der Variante KL noch leicht über den Werten der Variante K. Die Variante D wies gegenüber den Varianten K und KL leicht erhöhte Werte auf. Die Werte lagen jedoch im gesamten Messzeitraum 2000 in der Gefährdungsklasse sehr gering. Die Variante P wies gegenüber den nicht gepflügten Varianten im Jahr 2000 deutlich erhöhte Nitratgehalte auf (Abb. 24). Diese lagen ab dem 15.03.00 bis zum Ende der Messperiode 2000 über dem Wert von 10 mg NO_3^-/l . Am 23.03. und 14.04.00 wurden Werte über 15 mg NO_3^-/l ermittelt. Dies NO_3^- -Gehalte sind der Gefährdungsklasse gering zuzuordnen.

Der Messzeitraum im Jahr 2001 verlief vom 14.02.01 bis zum 06.06.01 (Abb. 24). Für die ersten 3 Messtermine dieser Periode konnte jedoch nur in der Variante D Bodenlösung gewonnen werden. Die Werte der Varianten K und KL lagen im gesamten Messzeitraum unter 5 mg NO_3^-/l und damit in der Gefährdungsklasse sehr gering. Die Variante P wies zu Beginn der Messungen, von Mitte März bis Ende April, höhere Werte als die Varianten K und KL auf (Abb. 24). Diese erhöhten Werte lagen jedoch unter 10 mg NO_3^-/l und somit in der Gefährdungsklasse sehr gering. Von Ende April bis zum Ende der Messperiode im Juni befanden sich die Werte der Varianten P, K und KL auf einem gleichen niedrigem Niveau. Die Variante D wies im Untersuchungszeitraum des Jahres 2001 deutlich erhöhte Nitratgehalte auf. Diese lagen zu Beginn der Messungen Mitte Februar bei 30 mg NO_3^-/l und somit in der Gefährdungsklasse mittel. Anfang März fielen die Nitratgehalte der Variante D in die Gefährdungsklasse gering. Ab dem 25.04.01 stiegen die gemessenen NO_3^- -Gehalte stark an. Bis zum Ende der Messperiode lagen sie vorwiegend in der Gefährdungsklasse hoch. Nur am 03.05. und 23.05.01 wurden kurzzeitig Werte der Klasse mittel erreicht (Abb. 24).

Im Untersuchungszeitraum traten nur geringe NH_4^- -Gehalte in den Bodenlösungen aller Bodenbearbeitungsvarianten auf. Im Durchschnitt lagen die NH_4^- -Gehalte in allen Varianten bei ca. 1 mg/l. Im Jahr 2000 waren keine größeren Unterschiede zwischen den Bodenbearbeitungsvarianten zu erkennen. An einzelnen Messterminen fiel die Variante P mit punktuell erhöhten NH_4^- -Gehalten heraus. Die größten Erhöhungen waren in der Variante P zu verzeichnen. Die geringsten NH_4^- -Gehalte der Bodenlösungen wies im Jahr 2000 hauptsächlich die Variante D auf. Im Jahr 2001 wurden im Untersuchungszeitraum keine größeren Unterschiede im NH_4^- -Gehalt zwischen den Varianten gemessen.

Vergleich der NO₃-Gehalte der Bodenlösungen und der Bodenproben

Für eine vergleichende Betrachtung wurden die Kurven des Nmin-Gehaltes der Bodenproben der Tiefe 60 – 90 cm herangezogen. Es wurde geprüft, wie gut die Nmin-Methode und die Saugkerzen-Methode hinsichtlich der Erfassung des NO₃-Gehaltes in einer bestimmten Bodenschicht übereinstimmen. Eine direkte Vergleichbarkeit kann jedoch nicht gewährleistet sein, da die Methoden Ergebnisse unterschiedlicher Stufen der Stoffumsatz- und Stofftransportprozesse erfassen. Die Tiefe 60 - 90 cm kennzeichnet die möglichen Umsatzprozesse, aus welchen der Nmin-Gehalt in den Bodenlösungen aus 90 cm Tiefe resultiert. Für den Vergleich muss aufgeführt werden, dass die Messungen zum Nmin-Gehalt der Bodenproben einen größeren Zeitraum umfassen, aber in einer gröberen zeitlichen Auflösung im Gegensatz zur Beprobung der Bodenlösung vorliegen.

Die Analysen der Bodenproben geben das Langzeitverhalten und die Entwicklungstendenzen wieder. Für die Untersuchung der Entwicklungstrends auf dieser Ebene ist diese Detailliertheit gerechtfertigt.

Bei der Betrachtung des Trends ergibt sich ein ähnliches Bild. Die vergleichenden Darstellungen finden sich in den Abb. A 7 bis Abb. A 10. Im Jahr 2000 lagen die NO₃-Gehalte der Variante P in der Tiefe 60 - 90 cm in dem vergleichbaren Zeitraum über denen der anderen Varianten. Der Höchstwert der Variante P wurde bei Analyse des NO₃-Gehaltes der Bodenproben am 28.02.00 erreicht (Abb. A 7). Bei der Analyse der Bodenlösungen wurde der Höchstwert jedoch erst am 14.04.00 ermittelt. Im Jahr 2001 sticht die Variante D mit deutlich erhöhten NO₃-Gehalten in den Bodenproben und den Bodenlösungen hervor. Im Jahr 2001 wurden die höchsten Gehalte der Bodenproben und der Bodenlösung in der Variante D jeweils im April gemessen. Dies war in den NO₃-Gehalten der Bodenlösungen zeitlich versetzt erkennbar (Abb. A 8).

Eine deutliche Ausnahme bildeten die Messtermine im Mai 2001 in der Variante D. Hier lag in der Tiefe 60 - 90 cm nur ein geringer NO₃-Gehalt in den Bodenproben vor. Jedoch in den Saugkerzen wurde eine Erhöhung der NO₃-Gehalte zu allen Messterminen im Mai ermittelt. Bei der Betrachtung des NO₃-Gehaltes der Bodenproben im Gesamtprofil wurde erkennbar, dass die Gehalte im Gesamtprofil ebenfalls erhöht sind, wobei der Hauptanteil in der Schicht 0 - 30 cm zu finden war (Daten nicht dargestellt).

Da die Nitratgehalte in den Bodenproben und den Bodenlösungen jeweils die höchsten Anteile am Nmin-Gehalt besitzen, verhalten sich die Nmin-Kurven ähnlich. Bei der Betrachtung

der Kurven der NH_4 -Gehalte der Bodenproben und der Bodenlösung bot sich ein unterschiedliches Bild (Daten nicht dargestellt). Die NH_4 -Gehalte der Bodenlösung der Variante P lagen im Jahr 2000 über den Gehalten der anderen Varianten. Dies war aus den Kurven der Bodenproben nicht klar erkennbar. Die NH_4 -Gehalte der Varianten P und K lagen in den Bodenproben im Frühjahr 2000 auf gleichem Niveau und über den Werten der Varianten D und KL. Im Jahr 2001 fiel bei den analysierten Bodenproben die Variante KL mit erhöhten NH_4 -Gehalten auf. Jedoch lagen die NH_4 -Werte der Bodenlösung der Variante KL im Frühjahr 2001 hauptsächlich unter denen der anderen Varianten. In den Bodenproben und auch in den Bodenlösungen waren die NH_4 -Gehalte jeweils gering. Auch die Unterschiede zwischen den Varianten nahmen jeweils nur geringe Ausmaße an. Um einen direkten Zusammenhang der Kurven zu erkennen, sind die Messzeiträume mittels Saugkerzen zu kurz. In den gesamten Messzeitraum der Saugkerzen fielen nur 4 Nmin-Termine der Entnahme von Bodenproben.

5.2.3 Humusgehalte und C/N-Verhältnisse

Da innerhalb des Untersuchungsschlages eine Entkalkung bis min. 1dm u. GOF ermittelt wurde, beschreiben alle Angaben das Corg/Nt-Verhältnis. Für die Vergleichbarkeit der Werte des Humus- und Stickstoffgehaltes wurden die Angaben in kg/m^2 und t/ha umgerechnet.

Entsprechende pH-Werte sind für das Ablaufen von Stoffumsatzprozessen entscheidend.

pH-Wert

In der Abb. 25 sind die ermittelten pH-Werte exemplarisch für das Jahre 2000 dargestellt.

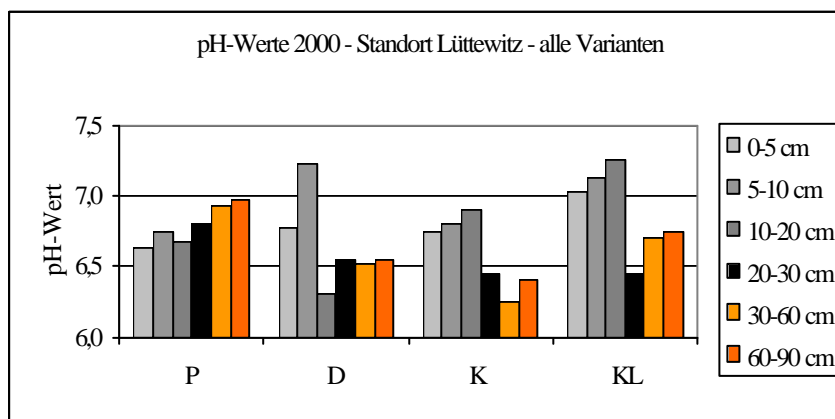


Abb.25. pH-Werte in den Bodenbearbeitungsvarianten im Jahr 2000.

Im Jahr 2000 wiesen die Varianten D, K und KL höhere pH-Werte in den Schichten 0 - 5 cm sowie 5 - 10 cm als die Variante P auf. In der Schicht 10 - 20 cm lagen die pH-Werte der Varianten K und KL über denen der Varianten P und D. In den Varianten K und KL wurden in den Tiefen bis 20 cm und in der Variante D bis 10 cm Tiefe pH-Werte näher am Neutralpunkt erreicht, als in der Variante P. In der Variante P zeigte sich eine stetige Zunahme des pH-Wertes mit der zunehmenden Messtiefe (Abb. 25). Alle gemessenen pH-Werte der Variante P lagen im Jahr 2000 nach KA 4 (1994) im Bereich sehr schwach sauer. Die für die Mineralisation günstigen pH-Werte um pH 7 wurden in der Variante P in den Tiefen 20 - 30 cm, 30 - 60 cm sowie 60 - 90 cm erreicht. Die Werte der Variante P waren in diesen Tiefen günstiger als in den Varianten D, K und KL. In den Varianten K und KL war ein deutlicher Abfall der pH-Werte ab der Messtiefe 20 - 30 cm zu erkennen. In der Variante D erfolgte dieser Abfall bereits in der Messtiefe 10 - 20 cm (Abb. 25). Insgesamt sind die aufgeführten Unterschiede geringfügig, sie liegen im Bereich von 0,2 - 0,8 Einheiten. Die Schwankungen innerhalb und zwischen der Varianten bewegen sich nach KA 4 (1994) in den Bereichen schwach sauer bis sehr schwach alkalisch.

Im Jahr 2001 waren die gemessenen pH-Werte in allen Varianten geringer als im Vorjahr. In der Variante P erfolgte ebenfalls wie im Vorjahr eine Zunahme der pH-Werte mit größerer Tiefe. Eine tendenzielle Zunahme der pH-Werte mit größerer Tiefe war auch in den Varianten D, K und KL zu beobachten. Die pH-Werte des Jahres 2001 lagen in den Varianten D, K und KL in allen Tiefen über denen der Variante P.

Humusgehalt

Da in der Fachliteratur zahlreiche Definitionen zum Bereich Humus und organische Bodensubstanz (OBS) kursieren, muss an dieser Stelle eine Begriffsbestimmung erfolgen. In der vorliegenden Arbeit wird die Definition nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1998) verwendet. Danach beschreiben Gehalt an organischer Substanz und Humusgehalt den gleichen Begriff. Die Bewertung der Humusgehalte erfolgt nach Klassen der KA 4 (1994).

Entwicklung der Humusgehalte – stationäre Messplätze

In den Abb. 26 und Abb. 27 sowie Abb. A 11 und Abb. A 12 sind die durch die LfL an den stationären Messplätzen ermittelten Humusgehalte der einzelnen Bodenbearbeitungsvarianten dargestellt. Aus der Abb. 26 der Humusgehalte der Variante P wird deutlich, dass in allen 3 Jahren bis 30 cm Tiefe ein relativ homogener Humusgehalt vorlag. Dieser Humusgehalt lag in den Jahren 1999 bis 2001 bei ca. 1,75 Masse-%. Der Wert entspricht nach KA 4 (1994) der

Klasse schwach humos. Im Zeitraum der 3 Untersuchungsjahre variierten die Humusgehalte der Krume gering im Bereich von 0,25 Masse-%.

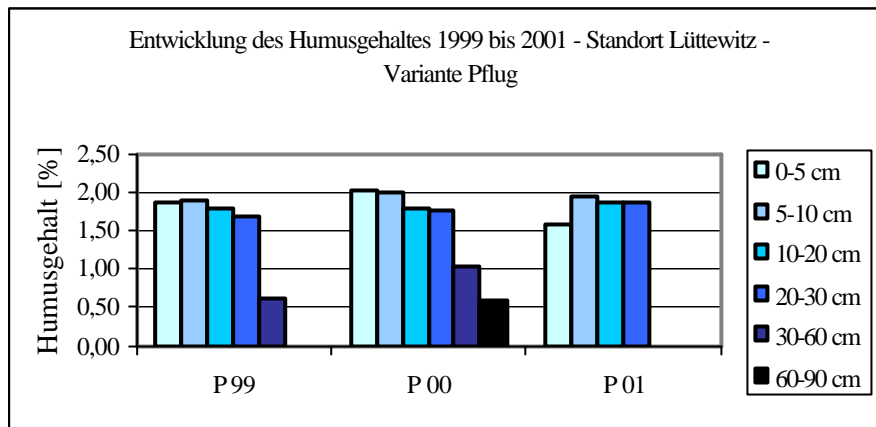


Abb.26. Humusgehalte der Variante P von 1999 bis 2001 (Probenahme in der Umgebung der stationären Messplätze).

In den tieferen Bodenschichten 30 – 60 cm und 60 – 90 cm nehmen die Humusgehalte deutlich ab. Dies ist durch den geringeren Anfall organischer Substanz und die fehlende Einmischung dieser Stoffe begründet. In den tieferen Bodenschichten wies die Variante P im Vergleich zu den Varianten D, K und KL die höheren Humusgehalte auf. Die Gehalte lagen im Bereich sehr schwach humos. Die höchsten Humusgehalte wurden in jeder Bodenbearbeitungsvariante in den obersten Bodentiefen ermittelt. Hier wird zwar durch die Bodenbearbeitung und durch die mit der Bodenbearbeitung einhergehende Durchlüftung die Mineralisation gefördert, jedoch machen sich in diesen Tiefen Düngungsmaßnahmen und anfallendes organisches Material stark bemerkbar. Teilweise sind die Humusgehalte der Tiefe 0 – 5 cm geringer als die Gehalte der Tiefe 5 – 10 cm (Abb. 26).

Durch die fehlende tiefe Bodenbearbeitung stellt sich in der Variante D kein homogener Humusgehalt im oberen Profilabschnitt ein. In der Abb. A 11 ist eine deutlich gestaffelte Abnahme der Humusgehalte unter der Bearbeitungstiefe von 5 cm zu erkennen. In den obersten 5 cm Boden wurden in der Variante D in allen 3 Jahren die höchsten Humusgehalte erreicht, welche in die Klasse mittel humos fallen. Die Humusgehalte lagen mit Werten von durchschnittlich 2,25 Masse-% über den Werten der Variante P in dieser Bodentiefe. Die Humusgehalte der Varianten K und KL waren in den oberen 10 cm ähnlich den Gehalten in der Variante D. Die Humusgehalte der Variante D unter 30 cm konnten im gesamten Untersuchungszeitraum als sehr schwach humos eingestuft werden (Abb. A 11). Im Untersuchungszeitraum waren keine großen Variationen zwischen den 3 Jahren in der Variante D erkennbar. Aus der Abb. A 11 wird ersichtlich, dass in der Variante D eine im Vergleich zur Variante P starke Abnahme der Humusgehalte mit zunehmender Tiefe erfolgt.

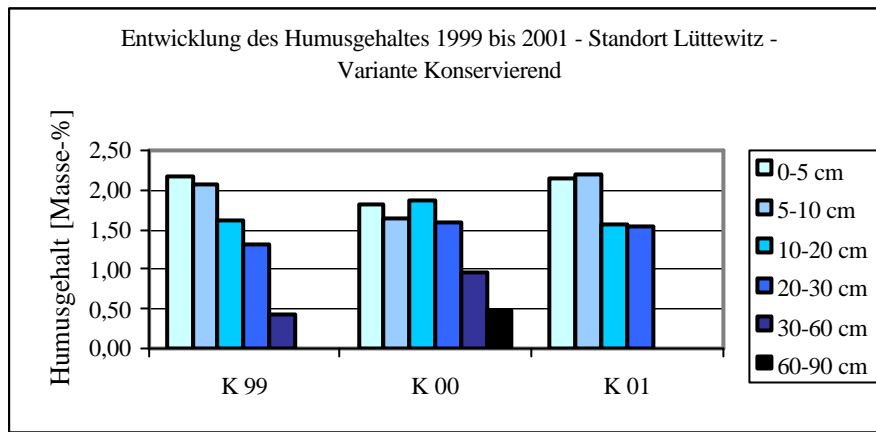


Abb. 27. Humusgehalte der Variante K von 1999 bis 2001 (Probenahme in der Umgebung der stationären Messplätze)

In der Variante K konnte ebenfalls ein deutliches Abfallen der Humusgehalte mit zunehmender Tiefe beobachtet werden (Abb. 27). Bis in die Bearbeitungstiefe von 10 cm wies die Variante K relativ homogene Humusgehalte auf. Diese lagen in den Jahren 1999 und 2001 im Bereich mittel humos und damit über denen der Variante P. Im Jahr 2000 waren in der Tiefe bis 10 cm in der Variante K die geringsten Humusgehalte im Untersuchungszeitraum zu finden. Die Humusgehalte bis 30 cm waren im Jahr 2000 in der Variante K relativ homogen. Die Gehalte unter 30 cm können im gesamten Untersuchungszeitraum nach KA 4 (1994) als sehr schwach humos eingestuft werden.

In der Abb. A 12 im Anhang ist die Entwicklung der Humusgehalte in der Variante KL von 1999 bis 2001 dargestellt. In den Tiefen 0 - 5 cm und 5 - 10 cm wurden die höchsten Humusgehalte ermittelt. Teilweise waren die Gehalte der Tiefe 0 - 5 cm geringer als die Gehalte der Tiefe 5 - 10 cm. Die Gehalte der Tiefen bis 10 cm lagen zwischen den Bereichen schwach humos bis mittel humos. Größere Variationen in den Humusgehalten zwischen den Untersuchungsjahren traten in der Variante KL nicht auf (Abb. A 12). Die Humusgehalte der Tiefe 10 - 20 cm und 20 - 30 cm lagen im gesamten Untersuchungszeitraum in dem Bereich schwach humos. Als sehr schwach humos konnten die ermittelten Humusgehalte der Tiefen 30 - 60 cm und 60 - 90 cm im gesamten Untersuchungszeitraum bezeichnet werden.

Die Humusgehalte der Varianten D, K und KL lagen in den Tiefen 0 - 5 cm über den Gehalten der Variante P. Eine Ausnahme bildete die Variante K im Untersuchungsjahr 2000. Auch die Humusgehalte der Tiefe 5 - 10 cm der Varianten K und KL lagen im Untersuchungszeitraum über den Gehalten der Variante P. Eine Ausnahme bildete die Variante K hier ebenfalls im Untersuchungsjahr 2000.

Entscheidend für den Landwirt ist jedoch die Tatsache, welche Humusgehalte der Kulturpflanze in der Krume zur Verfügung stehen. Weiterhin von Interesse ist eine mögliche Humusakkumulation in der Tiefe. In der Tab. 5 sind die Mittelwerte der Humusgehalte aus dem 3-jährigen Messzeitraum aufgeführt.

Tab. 5. Mittel der Humusgehalte im Untersuchungszeitraum von 1999 - 2001 (stationären Messplätze).

Humusgehalt [Gew.-%]	P	D	K	KL
0-30 cm	1,83	1,66	1,78	1,83
30-60 cm	0,82	0,44	0,68	0,55
60-90 cm	0,60	0,49	0,48	0,45

Aus der Tab. 5 kann erkannt werden, dass in den Varianten D und K die geringsten Humusgehalte in der Krume vorlagen. Den höchsten Humusgehalt in der Krume wiesen die Varianten P und KL auf. Die Werte aller Varianten lagen jedoch nach KA 4 (1994) in der Klasse mittel humos. Die beiden tieflockernden Varianten P und KL wiesen im Mittel den selben Humusgehalt in der Krume auf. Es wird die durchmischende Wirkung einer tiefen Bearbeitung sichtbar. Dabei ist es für diesen Aspekt scheinbar gleichgültig, ob die Bearbeitung mit dem Pflug oder Grubber erfolgt. Eine Humusanreicherung war in der Tiefe in den konservierend bewirtschafteten Varianten nicht zu beobachten. Bei Berücksichtigung der Dichten lagen die Werte der Krume bei allen Varianten bei ca. 72 t/ha auf gleichem Niveau (Daten nicht dargestellt). Auch bei Berücksichtigung der höheren Dichten im Unterboden der nichtgepflügten Varianten war keine Humusakkumulation erkennbar. Die Variante P erreichte im Unterboden die höchsten Werte. Ein anderes Bild bietet die Auswertung der eigenen flächenhaften Beprobung. Hier konnte eine Humusakkumulation in der Tiefe 30 - 60 cm besonders in den Varianten K und KL ermittelt werden.

Humusgehalte im Mikrorelief

Durch die quasi-flächenhafte Beprobung wurden die Parameter Corg und Nt im Mikrorelief erfasst. Für die Auswertung wurden höhenschichtenangepasste Gruppierungen (Tab. 6) gebildet.

Tab. 6. höhenschichtenangepasste Gruppierung der Probenahmepunkte (Punkte der flächenhafte Probenahme).

Gruppenbezeichnung	Punkte der Gruppe
G1 (275-280 m)	D1, K1, KL1
G2 (270-275 m N)	P1, D2, K2, KL3
G3 (270-275 m S)	P4, D4, K4, KL4, R1
G4 (265-270 m)	P5, D5, K5, KL5, R2
G5 (260-265 m)	P7, D7, K6
G6 (255-260 m)	D8, K7, KL6, R3

In der Gruppenbezeichnung ist die zugrundeliegende Höhengschicht aufgeführt. Die Buchstaben N und S kennzeichnen einen nördlichen und einen südlichen Bereich der Höhenstufe 270-275 m.

Humusgehalte in der Tiefe 0 - 5 cm

Ohne den Einfluss der Oberflächeneigenschaften müsste sich bestimmt durch den Bodentyp auf einer ebenen Fläche bei gleicher Bewirtschaftung ein ähnlicher typischer Humusgehalt in einem Bearbeitungsstreifen einstellen. Durch die Einflüsse des Mikroreliefs erfolgt dies nicht. Durch das Mikrorelief und die damit verbundenen Stoffumlagerungsprozesse treten Erhöhungen und Verminderungen des Humusgehaltes auf. In der Abb. 28 sind die ermittelten Humusgehalte der Tiefe 0 - 5 cm dargestellt. Die Bearbeitungsgrenzen trennen in dieser Darstellung von West nach Ost die Varianten Pflug, Direkt, Konservierend und Konservierend Locker. Aus der Darstellung der Humusgehalte im Mikrorelief kann erkannt werden, dass die Variante P deutlich die geringsten Humusgehalte in der oberen 5 cm Bodenschicht aufweist. Die Humusgehalte liegen hier im Mittel bei 1,5 Gew.-%. Eine leichte Zunahme kann in den Senkenbereichen an den Probepunkten P2 und P6 erkannt werden. An diesen Punkten wurde eine Erhöhung des Humusgehaltes auf 1,8 Gew.-% ermittelt. Die Humusgehalte dieser Variante können nach KA 4 (1994) als schwach humos eingeordnet werden.

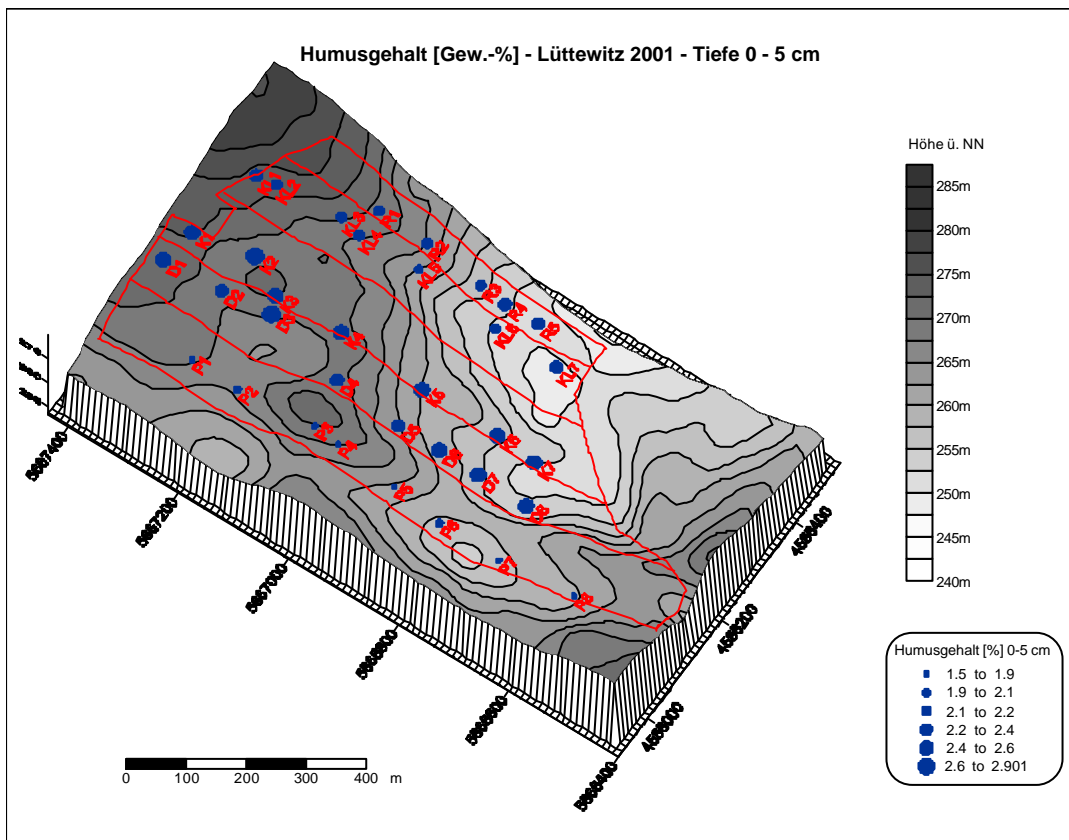


Abb. 28. Humusgehalte [Gew.-%] der Tiefe 0 - 5 cm im Mikrorelief.

In der Variante D wurden in dieser Tiefenstufe durchschnittliche Humusgehalte von 2,2 Gew.-% ermittelt. In den Senkenbereichen war eine Erhöhung auf 2,4 Gew.-% erkennbar. Nach KA 4 (1994) wird den Gehalten in dieser Variante die Klasse mittel humos zugeordnet. Dem Reliefeinfluss kann in der Variante D auch die Abnahme des Humusgehaltes am Punkt D2 zugeschrieben werden (Abb. 28). Ebenfalls in die Klasse mittel humos konnten die Gehalte der Variante K eingeordnet werden. Sie lagen im Mittel bei 2,4 Gew.-% und erreichten die höchsten Humusgehalte im Vergleich der Varianten.

Es wurde erkennbar, dass in der Variante K keine Zunahme des Humusgehaltes im südlichen Senkenbereich erfolgte. Nur im nördlichen Bereich der Variante K war innerhalb der Gruppe G2 eine Zunahme im Senkenbereich zu erkennen. Die Gehalte der Variante KL lagen unter denen der Varianten D und K. In der Variante KL lagen die ermittelten Humusgehalte im Durchschnitt bei 2,0 Gew.-%. Damit waren die Humusgehalte noch deutlich höher als in der Variante P. Eine Verringerung auf 1,8 Gew.-% war im Oberhangbereich am Punkt KL5 innerhalb der Gruppe G4 zu beobachten. Dies kann auf den Reliefeinfluss zurückgeführt werden. In den anderen Varianten der Gruppe G4 konnte diese Verringerung nicht beobachtet werden. Die Restfläche wies durchschnittliche Gehalte von 2,0 Gew.-% in den oberen 5 cm auf (Abb. 28). Erhöhungen auf einen Gehalt von 2,2 Gew.-% waren im südlichen Senkenbereich erkennbar.

Humusgehalte in der Tiefe 5-30 cm

Die ermittelten Humusgehalte im Bereich 5 – 30 cm sind in der Abb. 29 dargestellt. Auf die Bezeichnung der Probenahmepunkte wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet. Im Vergleich zur Darstellung der Humusgehalte der Tiefe 0 - 5 cm wurde für die Tiefe 5 - 30 cm eine Gliederung in drei Bereiche verwendet, da keine so großen Spannen der Humusgehalte wie in der obersten 5 cm auftraten. Insgesamt wurden in allen Varianten geringere Humusgehalte als in den oberen 5 cm ermittelt. An nahezu allen Messpunkten wurden für die Variante P die geringsten Gehalte erfasst. Nur die Variante D wies an 2 Messpunkten geringere Gehalte auf. Dies ist in der Variante D nicht auf den Reliefeinfluss, sondern auf die fehlende anthropogene Mischung des Bodens bis in 30 cm Tiefe zurückzuführen. Die Humusgehalte in der Variante P lagen durchschnittlich bei 1,7 Gew.-%. Eine deutliche Verringerung dieses Gehaltes ist am Punkt P5 im Mittelhangbereich zu erkennen (Abb. 29). Hier fiel der Humusgehalt auf 1,2 Gew.-%. An den im Hangverlauf folgenden Punkten ist wieder eine deutliche Zunahme des Humusgehaltes auf 1,9 Gew.-% sichtbar. Der Reliefeinfluss war hier eindeutig durch die starke Verringerung im Mittelhangbereich und die Akkumulation von Bodenmaterial am Hangfuß zu erkennen. Das Pflügen fördert durch eine Überlockerung der obersten B-

denschicht einen Materialversatz entlang der Gefällelinie. Ein ebenso starkes Abfallen des Humusgehaltes in der Gruppe 4 war in der Variante KL am Punkt KL 5 zu erkennen. Der Humusgehalt fiel in dieser Variante in ähnlicher Größenordnung wie in der Variante P ab. Die Variante D wies einen durchschnittlichen Humusgehalt von 1,7 Gew.-% in der Tiefe 5 – 30 cm auf. Verringerungen waren im nördlichen Senkenbereich und am Mittelhang zu erkennen. Die geringsten Variationen der Humusgehalte waren in den Varianten K und KL erkennbar.

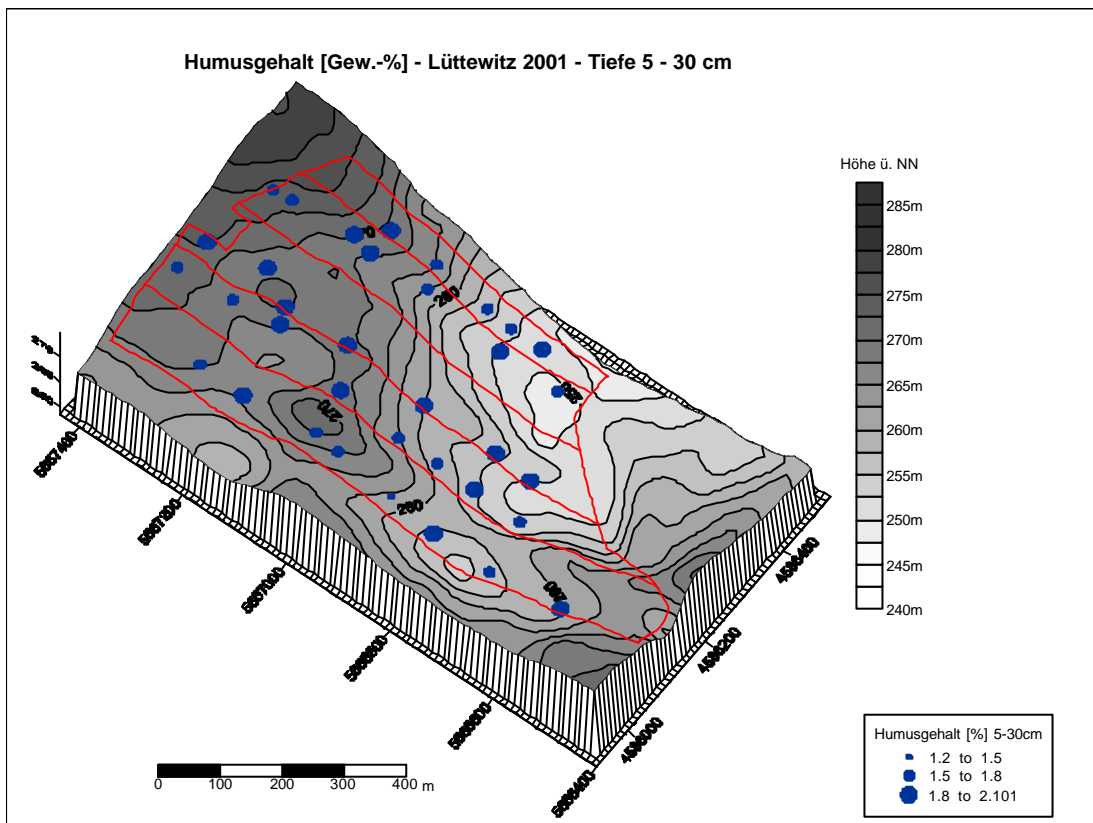


Abb. 29. Humusgehalte [Gew.-%] der Tiefe 5-30 cm im Mikrorelief (Darstellung der Bearbeitungsgrenzen der Varianten P, D, K und KL von West nach Ost)

Humusgehalte der Krume

In der Tab. 7 sind die durchschnittlich ermittelten Humusgehalte der flächenhaften Beprobung dargestellt. Um eine noch bessere Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden die Humusgehalte mittels der gemessenen durchschnittlichen Dichte in die Einheit t/ha umgerechnet. Durch die für die Bearbeitungsvarianten typischen Bodendichten wurde der Humusgehalt für das entsprechend mächtige Bodenkompartment ermittelt. Die entscheidende Beeinflussung wird z.B. in der Krume für die Variante D deutlich. Insgesamt lässt sich erkennen, dass die Varianten D, K und KL in der Krume deutlich höhere Humusgehalte im Vergleich zur Variante P aufwiesen (Tab. 7). In der Variante D wird der Humusgehalt in der Krume entscheidend durch den Gehalt in den obersten 5 cm geprägt. Die Variante D besaß insgesamt den

höchsten Humusgehalt der Krume in t/ha. Dieser lag aber nur geringfügig höher als der Gehalt der Variante K.

Tab.7. durchschnittliche Humusgehalte der flächenhaften Beprobung.

Humusgehalt [Gew.-%]					Humusgehalt [t/ha]				
Tiefe	P	D	K	KL	Tiefe	P	D	K	KL
0-5 cm	1,7	2,4	2,4	2,1	0-5 cm	10,5	16,4	14,9	11,9
5-30 cm	1,7	1,7	1,9	1,8	5-30 cm	59,5	64,6	71,7	67,1
30-60 cm	1,2	1,2	1,4	1,3	30-60 cm	51,5	53,6	68,0	62,0
0-30 cm	1,7	2,1	2,2	2,0	0-30 cm	67,3	91,4	91,1	78,6

In der Abb. 30 sind die interpolierten Humusgehalte der Tiefe 0 - 30 cm als flächenhafte Darstellung abgebildet. Es muss auf die begrenzte Aussagekraft der interpolierten Humusgehalte hingewiesen werden. Es ist zu beachten, dass die Interpolation über die Grenzen der Bodenbearbeitungsvarianten hinweg durchgeführt wurde und dies die Fragestellung nach Unterschieden im Humusgehalt zwischen den Varianten, besonders in der Nähe der Bearbeitungsgrenzen nicht beantworten lässt. Die wichtigen Unterschiede zur Stärke des Reliefeinflusses sind jedoch aus dieser Darstellung sehr gut ersichtlich.

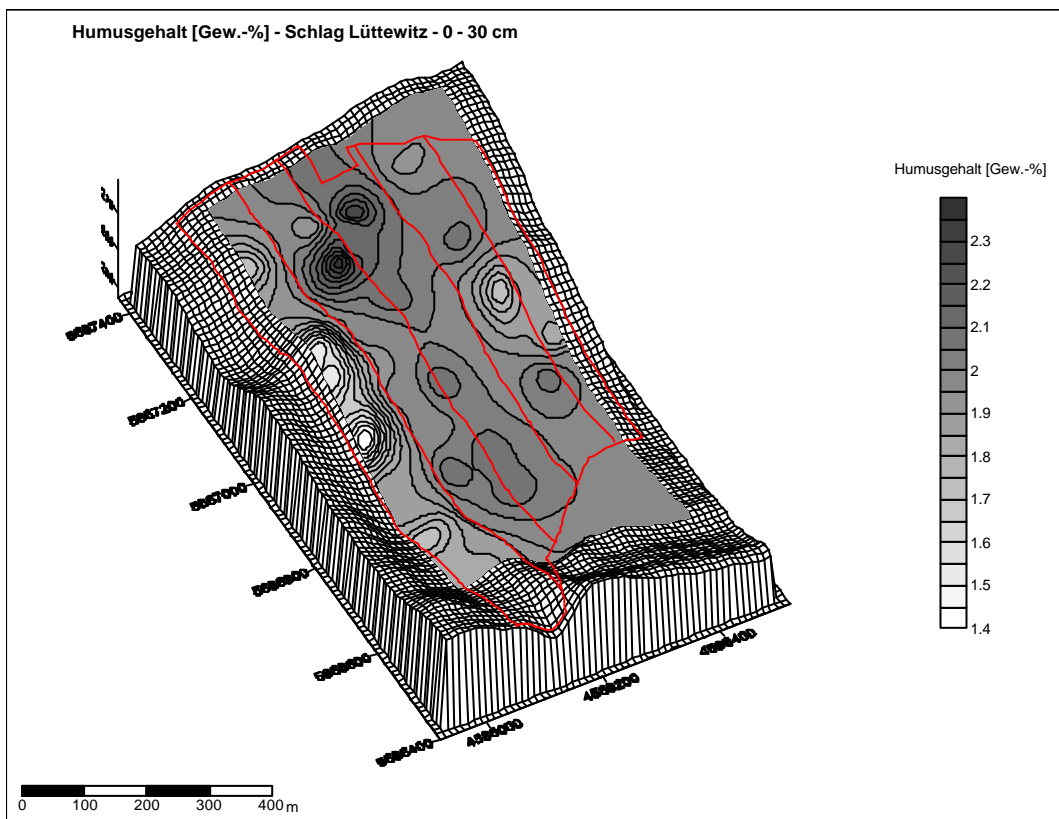


Abb. 30. Humusgehalte der Krume im Mikrorelief. (Humusgehalte interpoliert).

Es ist erkennbar, dass Erhöhungen der Humusgehalte in allen Varianten im südlichen Senkenbereich zu finden waren. Im nördlichen Senkenbereich konnten Humusanreicherungen in

den für die Dellenstrukturen im Mittelsächsischen Lößhügelland typischen Zwischensenken ausgemacht werden. Dies war deutlich in den Varianten D und K erkennbar.

In der Variante P war eine Humusanreicherung in der nach Westen auslaufenden nördlichen Senke zu finden. Diese Senkenstruktur findet sich in dem nach TEIWES (1997) ausgewiesenen Bodentyp Kolluvisol wieder. Die Erosionsprozesse, welche in dieser Zwischenform ablaufen, sind in Abb. 31 dokumentiert.



Abb. 31. Erosionsprozesse innerhalb der Zwischenstrukturen – Bearbeitungsgrenze zwischen den Varianten P und K (Aufnahme vom 31.01.2002, Breite der Erosionsrinne ca. 50 cm und Länge ca. 10 m).

Insgesamt wurden in der Krume in den Varianten D, K und KL höhere Humusgehalte im Vergleich zur Variante P ermittelt. Deutlich ist in der Abb. 31 die erosionsmindernde Wirkung einer konservierenden Bodenbearbeitung sichtbar. In der Variante D war zum Zeitpunkt der Aufnahme nur ein geringer Oberflächenabfluss und Materialtransport zu erkennen. Wogegen in der Variante P deutliche Erosions- und Verschlammungserscheinungen festgestellt werden konnten.

Humusgehalte in der Tiefe 30 - 60 cm

In der Abb. A 13 ist eine interpolierte Darstellung der Humusgehalte für die Tiefe 30 - 60 cm erkennbar. Deutliche Unterschiede traten auch zwischen den Varianten K und KL in Bezug zur Restfläche auf. Die Restfläche ist gekennzeichnet durch eine der Variante K ähnlichen Bodenbearbeitung. Dennoch wies die Restfläche unterschiedliche Humusgehalte innerhalb der selben Gruppe auf. Dies kennzeichnet die Rolle des inhomogenen Mikroreliefs, dass selbst bei ähnlicher Bewirtschaftungsweise zwischen eng nebeneinander liegenden Punkten Unterschiede entstehen lässt. Die Variante D wies stellenweise die geringsten Gehalte in die-

ser Tiefe auf (Abb. A 13). Die Varianten K und KL waren durch höhere Gehalte gekennzeichnet, welche denen der Variante P gleichzusetzen, bzw. teilweise höher sind. Besonders in der Gruppe G4 hob sich die Variante K mit erhöhten Humusgehalten heraus. Sämtliche Punkte dieser Gruppe lagen innerhalb der entsprechenden Bodenbearbeitungsvariante im Oberhangbereich. Dies würde in der Variante K auf stabilere Zustände in Bezug auf in längeren Zeiträumen ablaufenden Umlagerungsprozesse im Bodenkompartment hinweisen.

Es wird deutlich, dass der die Umlagerungsprozesse mitbestimmende Reliefeinfluss in dieser Tiefe nicht außer Kraft gesetzt ist. Bei der Darstellung der Humusgehalte im Geländemodell wurde erkennbar, dass ebenso wie in den oberen Bodenschichten in der Variante KL und besonders in der Variante P deutlich verringerte Humusgehalte im Oberhangbereich ermittelt wurden. Eine Zunahme des Humusgehaltes war in den Senkenbereichen zu erkennen. In den Varianten D und K war dies nicht so deutlich ausgebildet.

Entwicklung der C/N-Verhältnisse innerhalb der Jahre 1999 bis 2001

Durch das C/N-Verhältnis sind Aussagen zur Umsatzgeschwindigkeit der organischen Bodensubstanz (OBS) möglich. In den Abb. 32 und Abb. 33 sind die Entwicklungen des C/N-Verhältnisses anhand der Diagramme der Varianten P und D dargestellt. Die Darstellungen kennzeichnen die Entwicklungen anhand der Proben der stationären Messplätze. Auf die Darstellung der Variante K und KL wurde an dieser Stelle verzichtet, da größere Änderungen im Vergleich der Varianten nicht zu verzeichnen waren. Die C/N-Verhältnisse lagen in allen Varianten besonders in den oberen Tiefen durchschnittlich um den Wert 9. Dieses C/N-Verhältnis wird nach KA 4 (1994) als sehr hoch bezeichnet und kennzeichnet damit sehr gute Umsatzbedingungen. Die günstigsten C/N-Verhältnisse im Untersuchungszeitraum wies die Variante K auf. Bis auf 3 Ausnahmen lagen die C/N-Verhältnisse der Variante K bei 8.

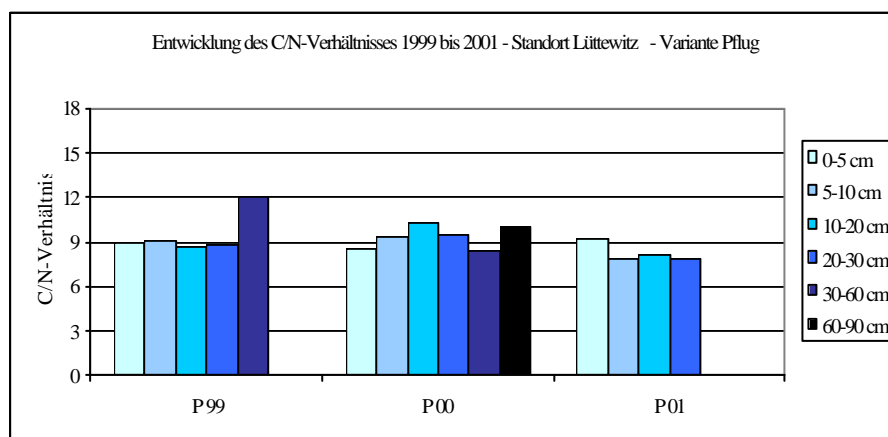


Abb.32. Entwicklung des C/N-Verhältnisses in der Variante P (Probenahme an den stationären Messplätzen).

In der Variante P waren im Jahr 1999 sehr homogene Verhältnisse zu verzeichnen. Bis in die Tiefe von 30 cm lag das Verhältnis bei 9. In der Messtiefe 30 - 60 cm stieg das C/N-Verhältnis auf den Wert 12, was auf einen geringeren Stickstoffgehalt in dieser Tiefe schließen lässt. Die homogenen Verhältnisse bis 30 cm Tiefe (Abb. 32) können der durchmischenden Wirkung des Pfluges zugeordnet werden. In den anderen Varianten traten jedoch im Jahr 1999 ebenfalls sehr homogene Verhältnisse von 9 bis in die Tiefe von 30 cm auf. In der Messtiefe 60 - 90 cm war ein Ansteigen des C/N-Verhältnisses zu verzeichnen, wobei Werte der Klasse hoch nach KA 4 (1994) erreicht werden.

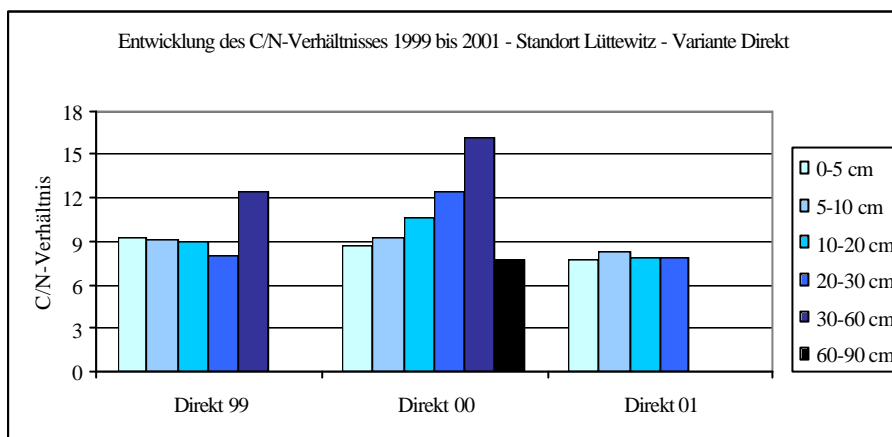


Abb.33. Entwicklung des C/N-Verhältnisses in der Variante D (Probenahme an den stationären Messplätzen).

In allen Varianten war im Jahr 1999 in der Tiefe 30 - 60 cm ein höheres C/N-Verhältnis im Vergleich zu den anderen Messtiefen zu finden. Im Jahr 2000 konnte in der Variante D ebenfalls dieses Ansteigen des C/N-Verhältnisses in dieser Tiefe gemessen werden. Im Jahr 2000 stieg das C/N-Verhältnis in der Tiefe 30 - 60 cm in der Variante D auf den Wert 16 und lag somit in der Klasse mittel (Abb. 33). In den Varianten K und KL konnte ein Ansteigen des C/N-Verhältnisses in dieser Tiefe im Jahr 2000 sowie im Jahr 2001 nicht wieder beobachtet werden (Daten nicht dargestellt). In der Variante D war im Jahr 2000 ein mit zunehmender Tiefe abfallender Nt-Gehalt festzustellen, was sich durch eine Weitung des C/N-Verhältnisses äußerte. Trotz fehlender tiefer Bodenbearbeitung in der Variante D konnte dies im Folgejahr 2001 nicht erneut gemessen werden.

Bei der Betrachtung des Nt-Gehaltes ergab sich ein ähnliches Bild wie beim Humusgehalt. Die Variante D wies in den obersten 5 cm den höchsten Nt-Gehalt im Vergleich der Varianten auf. Dieser lag bei 0,16 Gew.-%. In der Variante P lag ein relativ homogener Nt-Gehalt von 0,12 Gew.-% in der Krume vor. In den Tiefen unter 30 cm erfolgte in der Variante P ein deutlicher Abfall auf 0,05 Gew.-% (Daten nicht dargestellt). Die höchsten Nt-Gehalte fanden sich in allen Varianten in der Tiefe 0 - 5 cm. Ein sprunghafter Abfall des Nt-Gehaltes war in den

Varianten K und KL, ebenso wie in der Variante P in den Messtiefen unter 30 cm zu verzeichnen. Es muss berücksichtigt werden, dass die beprobten Messtiefen 20 - 30 cm und 30 - 60 cm unterschiedliche Schichtmächtigkeiten repräsentieren.

In der Tiefe 60 - 90 cm waren keine Unterschiede im Mittel der Nt-Gehalte im 3-jährigen Untersuchungszeitraum zwischen den Varianten zu verzeichnen waren. Die Werte lagen hier bei 0,04 Gew.-% (Daten nicht dargestellt). In der Tiefe 30 - 60 cm besaß die Variante D einen deutlich geringeren Nt-Gehalt als die anderen Varianten. Auch in der Krume wies die Variante D mit 0,11 Gew.-% den geringsten Nt-Gehalt auf. Die Varianten P und KL waren mit 0,12 Gew.-% durch gleiche Nt-Gehalte in der Krume gekennzeichnet. Hier zeigt sich erneut, dass eine tiefe Lockerung in der gelockerten Schicht homogene Werte erzeugt. Dabei schien es gleichgültig zu sein, ob die Lockerung mit dem Pflug oder Grubber erfolgte. Den höchsten Nt-Gehalt in der Krume wies mit 0,13 Gew.-% die Variante K auf.

C/N-Verhältnisse im Mikrorelief

Insgesamt konnte ein sehr enges C/N-Verhältnis in allen Varianten und allen Tiefen festgestellt werden. Dieses Verhältnis erreichte in keiner Tiefe größere Werte als 10. Dadurch sind gute Umsatzbedingungen der organischen Bodensubstanz auf der gesamten Fläche gegeben.

C/N-Verhältnis der Tiefe 0 - 5 cm

In der Abb. 34 sind die ermittelten C/N-Verhältnisse in der Tiefe 0 – 5cm innerhalb der Fläche des Untersuchungsschlages dargestellt. Die engsten C/N-Verhältnisse der Tiefe 0 – 5 cm sind in der Variante P erkennbar (Abb. 34). Diese lagen bei Werten zwischen 6 – 6,5. In der Variante P waren geringe Weitungen im nördlichen und südlichen Senkenbereich zu verzeichnen. Hier waren Zunahmen der Humus- und Nt-Gehalte erkennbar. Dabei stiegen die Humusgehalte in größeren Relationen und bewirkten so eine Weitung des C/N-Verhältnisses. In der Variante D wurde ein durchschnittliches Verhältnis von 7,4 in den oberen 5 cm ermittelt. Es sind geringe Erhöhungen im nördlichen Senkenbereich erkennbar (Abb. 34). In der Variante K wurde ein durchschnittliches C/N-Verhältnis von 6,9 ermittelt. Im nördlichen Bereich der Variante, an den Punkten K1 – K3 lagen engere C/N-Verhältnisse vor. Diese Verhältnisse waren dort durch einen höheren Nt-Gehalt begründet. Auch am Punkt K7 wurde aufgrund eines erhöhten Nt-Gehaltes ein engeres C/N-Verhältnis ermittelt. Die Variante D und die beprobte Restfläche wiesen das weiteste C/N-Verhältnis in dieser Tiefe aus. Dieses lag bei 7,5 in 0 – 5 cm Tiefe. Insgesamt besaßen die Varianten D und K die höchsten Nt-Gehalte in den obersten 5 cm. Dabei traten in der Variante D größere Varianten des

Nt-Gehaltes im Verlauf auf. Die Variante KL besaß in der Tiefe 0 – 5 cm ein durchschnittliches C/N-Verhältnis von 6,9. Ein sehr enges Verhältnis lag im Oberhangbereich an den Punkten KL4 und KL5 vor (Abb. 34). Das enge C/N-Verhältnis war an diesen Punkten durch erhöhte Nt-Gehalte begründet. Das C/N-Verhältnis weitete sich wieder im Bereich der südlichen Senke durch erhöhte Corg-Gehalte.

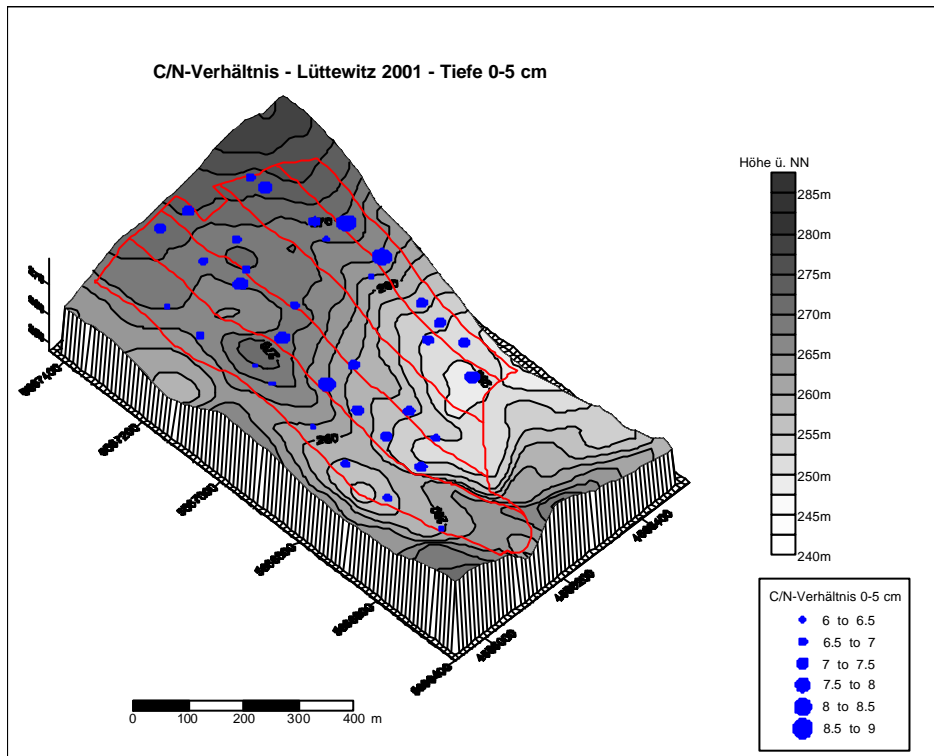


Abb. 34. C/N-Verhältnis der Tiefe 0-5 cm – flächenhafte Beprobung.

C/N-Verhältnis in der Tiefe 5 - 30 cm

Aus der Abb. 35 wird ersichtlich, dass in der Tiefe 5 – 30 cm größere Unterschiede im C/N-Verhältnis innerhalb des Mikroreliefs in den Varianten P, D, KL und auf der Restfläche auftraten. In der Variante K war eine sehr homogenes C/N-Verhältnis ausgebildet. Dieses Verhältnis lag bei 6,5. In der Variante P waren größere Variationen erkennbar. Der durchschnittliche C/N-Wert in der Variante P lag bei 6,6. In den Senkenbereichen waren Weitungen des C/N-Verhältnisses erkennbar. Diese Weitung war auf eine stärkere Zunahme an Corg zurückzuführen ist. Die Zu- und Abnahmen von Corg- und Nt-Gehalten verliefen annähernd simultan. In der Variante D lag das durchschnittliche C/N-Verhältnis in der Tiefe 5 – 30 cm bei 6,6 und war somit dem Verhältnis in der Variante P gleichzusetzen (Abb. 35). Ein höheres C/N-Verhältnis wurde an den Punkten D1 und D3 ermittelt. Dies ist hier durch erhöhte Humusgehalte begründet. In der Variante KL konnte ein durchschnittliches C/N-Verhältnis von 6,8 ermittelt werden. Eine Erhöhung ist besonders im südlichen Senkenbereich am Punkt KL 6 erkennbar. Diese Weitung war durch ein starkes Ansteigen des Corg-Gehaltes begründet.

Insgesamt kennzeichnen die C/N-Verhältnisse der Tiefe 5 – 30 cm in allen Varianten sehr gute Bedingungen für den Umsatz der OBS.

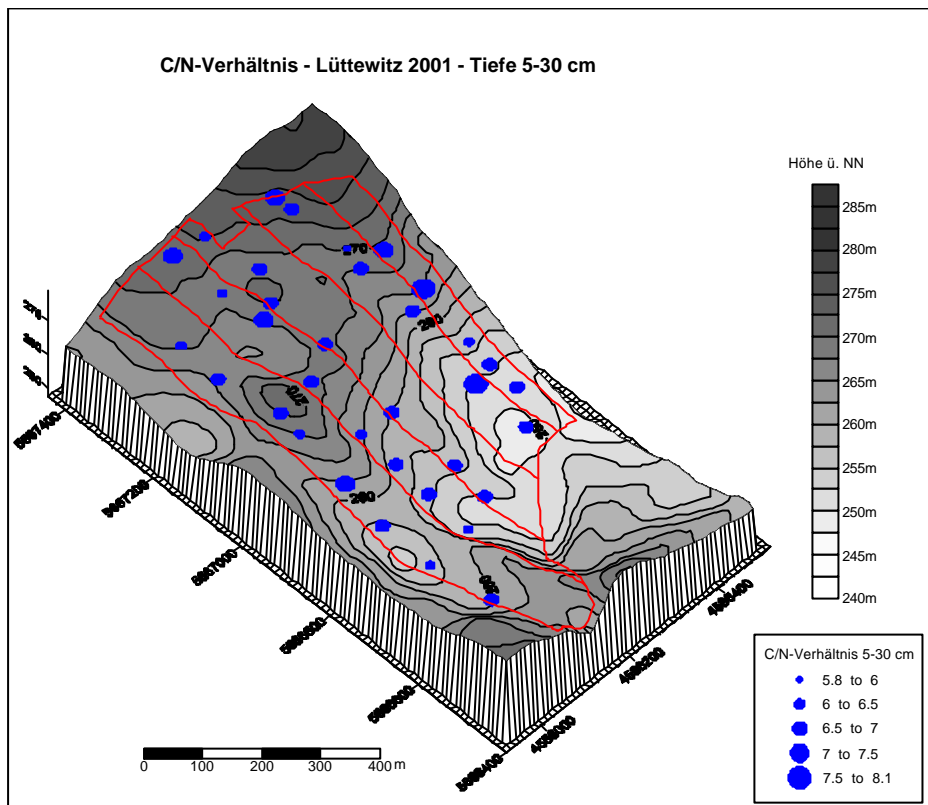


Abb. 35. C/N-Verhältnisse der Tiefe 5-30 cm – flächenhafte Probenahme.

C/N-Verhältnis der Krume

In der Krume wurden für die Variante D und die Restfläche durchschnittlich die höchsten C/N-Verhältnisse ermittelt (Daten nicht dargestellt). Die Verhältnisse lagen bei 7 in der Variante D und bei 7,3 innerhalb der Restfläche. Die Varianten P und KL wiesen die engsten Verhältnisse auf und unterschieden sich voneinander nur sehr gering. In der Krume besaßen die Varianten D und K die höchsten Nt-Gehalte. Diese lagen bei 0,18 Gew.-%. Durch den Einbezug der höheren Dichte wurden jedoch für die Variante D die höchsten Gehalte im Vergleich der Varianten ermittelt. So wurden in den Varianten D und K bis zu 1,5 t/ha bzw. 1,1 t/ha mehr Nt als in der gepflügten Variante ermittelt.

C/N-Verhältnis in der Tiefe 30 - 60 cm

In der Variante P lag das durchschnittliche C/N-Verhältnis in der Tiefe 30 – 60 cm bei 6,2. An den Punkten P1 und P6 waren Weitungen des C/N-Verhältnisses zu verzeichnen. Diese Weitungen waren auf die Zunahme des Corg-Gehaltes zurückzuführen. In den Varianten P, D und K traten keine größeren Schwankungen des C/N-Verhältnisses im Reliefverlauf auf. Weite Schwankungsbereiche wurden in der Variante KL sowie auf der beprobten Restfläche ermittelt. In der Variante D lag das ermittelte durchschnittliche C/N-Verhältnis bei 6,3. In der Vari-

ante K war wie in der Variante D ein homogenes C/N-Verhältnis innerhalb des Variantenverlaufs ersichtlich (Daten nicht dargestellt). An den Punkten K1 und K2 traten jeweils erhöhte Corg- und Nt-Gehalte auf. In der Variante KL war eine deutliche Weitung des Verhältnisses im südlichen Senkenbereich zu erkennen. Dies war auf eine Zunahme des Corg-Gehaltes zurückzuführen.

Referenzpunkt

Es wurde geprüft, wie aussagekräftig das gewählte Probenahmeschema ist. Dafür wurde ein Referenzpunkt ausgewählt, an dem eventuelle Unterschiede zwischen den Einzelproben und der Mischprobe deutlich werden sollten. Die ermittelten Ergebnisse sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tab. 8. Corg- und Nt-Gehalte am Referenzpunkt D5.

Nt in Gew.-%					
Tiefe	D5	D5I	D5II	D5III	Mittel Variante
0-5 cm	0,16	0,18	0,21	0,19	0,20
5-30 cm	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15
30-60 cm	0,11	0,11	0,13	0,11	0,11

Corg in Gew.-%					
Tiefe	D5	D5I	D5II	D5III	Mittel Variante
0-5 cm	1,3	1,2	1,7	1,3	1,4
5-30 cm	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
30-60 cm	0,6	0,6	0,9	0,7	0,7

C/N-Verhältnis					
Tiefe	D5	D5I	D5II	D5III	Mittel Variante
0-5 cm	8,1	6,7	8,1	6,8	7,4
5-30 cm	6,3	6,3	6,7	6,7	6,6
30-60 cm	5,5	5,5	6,9	6,4	6,3

Es wurde der Punkt D5 ausgewählt, da an dieser Stelle eine größere ebene Fläche und ein homogener Bodentyp gegeben war. An diesem Punkt wurden die 3 einzelnen Bodenmengen jeder Tiefenstufe wie üblich entnommen, als Mischprobe dieser Tiefe vereinigt und analysiert. Anschließend wurde an den 3 Punkten jede Tiefe einzeln beprobt. Die Einzelpunkte sind mit D5I, D5II und D5III bezeichnet. Betrachtet man die Mittelwerte die sich aus der Vermischung dieser 3 Punkte ergeben würden und den tatsächlich ermittelten Werte der Mischprobe, wird deutlich, welche Unterschiede auftreten (Tab. 8). Die Einstiche lagen nur wenige cm auseinander. Es wird erkennbar, dass in der Tiefe 0 - 5 cm sowohl innerhalb der Corg-Gehalte als auch innerhalb der ermittelten Nt-Gehalte die größten Variationen der Einzelwerte zu verzeichnen sind.

Am deutlichsten werden die Unterschiede im C/N-Verhältnis sichtbar. Hier traten die größten Variationen in den Tiefen 0 - 5 cm und 30 - 60 cm auf. Es wurde erkennbar, wie sensibel das C/N-Verhältnis auf die Änderungen der Corg- und Nt-Gehalte zwischen den Einzelwerten reagiert. Auch wurde deutlich, dass ein Mittelwert in der von der Bodenbearbeitung vorrangig beeinflussten Bodenschicht, hier die obersten 5 cm, für die Gesamtheit des Bearbeitungstreifen nur einen begrenzten Aussagewert besitzt. Insgesamt traten Streuungen der Einzelwerte in einem erwarteten und vertretbaren Rahmen auf.

5.3 Auswertung des Wasserhaushaltes

5.3.1 Witterungsverlauf

Witterungsverlauf der Untersuchungsjahre 1999 bis 2001

In der Abb. 36 sind die monatlichen Niederschlagssummen und die Durchschnittstemperaturen im Untersuchungszeitraum dargestellt. Durch höhere Niederschläge besteht die Möglichkeit der Bildung größerer Sickerwassermengen, wodurch eine höhere Auswaschungsgefahr gegeben ist.

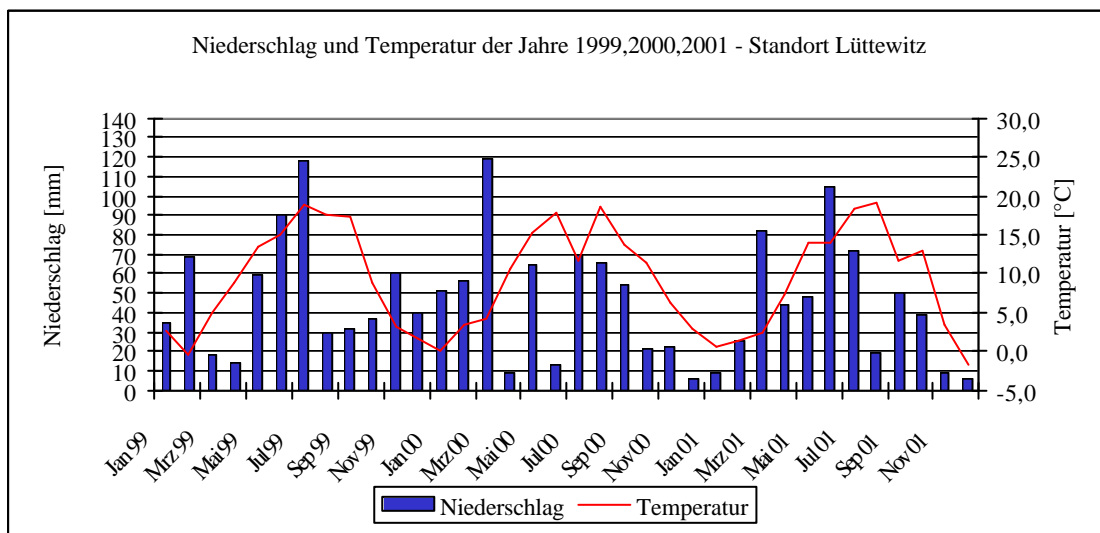


Abb. 36. Witterungskennwerte der Jahre 1999 bis 2001 der Station Lüttewitz.

Es wird erkennbar, dass die 3 Untersuchungsjahre durch einen sehr unterschiedlichen Witterungsverlauf geprägt sind. Hohe Niederschlagsmengen fielen im gesamten Untersuchungszeitraum jeweils im Januar bis März, in den Sommermonaten Juni bis August sowie im Oktober und November.

Das Jahr 1999

Das Frühjahr 1999 war deutlich trockener als dieser Zeitraum in den beiden anderen Untersuchungsjahren (Abb. 36). Im Juni und Juli wurden Niederschlagssummen von 90 bzw. 120 mm ermittelt, die damit deutlich höher lagen als die Werte dieser Monate in den anderen Jahren. Im Jahr 1999 wurde ein Gesamtniederschlag von 605,0 mm ermittelt. Damit fielen 1999 ca. 50 mm bzw. ca. 94 mm mehr Niederschlag als im Jahr 2000 bzw. 2001. Im Vergleich zum langjährigen Mittel lag der Niederschlag jedoch um 37,0 mm geringer. In der Hauptwachstumszeit von Mai bis September fielen im Jahr 1999 insgesamt 330,2 mm Niederschlag. Insgesamt ist im Jahr 1999 ein relativ gleichmäßiger Temperaturverlauf im Laufe des Jahres zu erkennen. Im Jahr 1999 wurde eine Durchschnittstemperatur von 9,4 °C ermittelt.

Das Jahr 2000

Im Frühjahr 2000 fielen mehr Niederschläge als noch im Vorjahr, wobei der März mit 120 mm deutlich herausragt (Abb. 36). Diese Monatssumme bildet den Höchstwert im gesamten Untersuchungszeitraum. Ähnliche hohe Werte wurden in den anderen Untersuchungsjahren nur im Juni oder Juli erreicht. Der Sommerbeginn gestaltete sich sehr trocken. Im Juni fielen mit 13,5 mm nur sehr geringe Niederschlagsmengen. In den Wintermonaten im Jahr 2000 fiel deutlich weniger Niederschlag als im Winter 1999/2000 (Abb. 36). Im Jahr 2000 wurde ein Gesamtniederschlag von 555,4 mm ermittelt. Es wurde der geringste Sommerniederschlag (April bis September) im gesamten Untersuchungszeitraum gemessen. In der Hauptwachstumszeit wurden 268,9 mm Niederschlag ermittelt. Die Jahresdurchschnittstemperatur lag im Jahr 2000 bei 9,7 °C. Es war das wärmste Jahr im Untersuchungszeitraum.

Das Jahr 2001

Im Jahr 2001 waren im Frühjahr und in den Sommermonaten hohe Niederschläge zu verzeichnen. Im März 2001 wurden mit über 80 mm Niederschlag relativ hohe Werte gemessen. Die höchste Niederschlagsmenge wurde im Juni mit 105 mm erreicht. Im Jahr 2001 wurde ein Jahresniederschlag von 511,2 mm ermittelt. Das Jahr 2001 wies im Untersuchungszeitraum den geringsten Jahresniederschlag auf. Dieser lag sogar 130,8 mm unter dem langjährigen Mittel. In der Hauptwachstumszeit fielen 295,2 mm Niederschlag. Die errechnete Jahresdurchschnittstemperatur lag im Jahr 2001 bei 8,7 °C und lag damit 0,6 °C über dem langjährigen Mittel. Mit dieser Jahresdurchschnittstemperatur war das Jahr 2001 jedoch das kühlestes Jahr im Untersuchungszeitraum.

Vergleich der Klimastationen

Die Darstellung in der Abb. 37 verdeutlicht, wie entscheidend eine lokale Klimastation für Fragestellungen auf der Mikroebene ist. Die Niederschläge streuten in diesem engen Raum sehr stark.

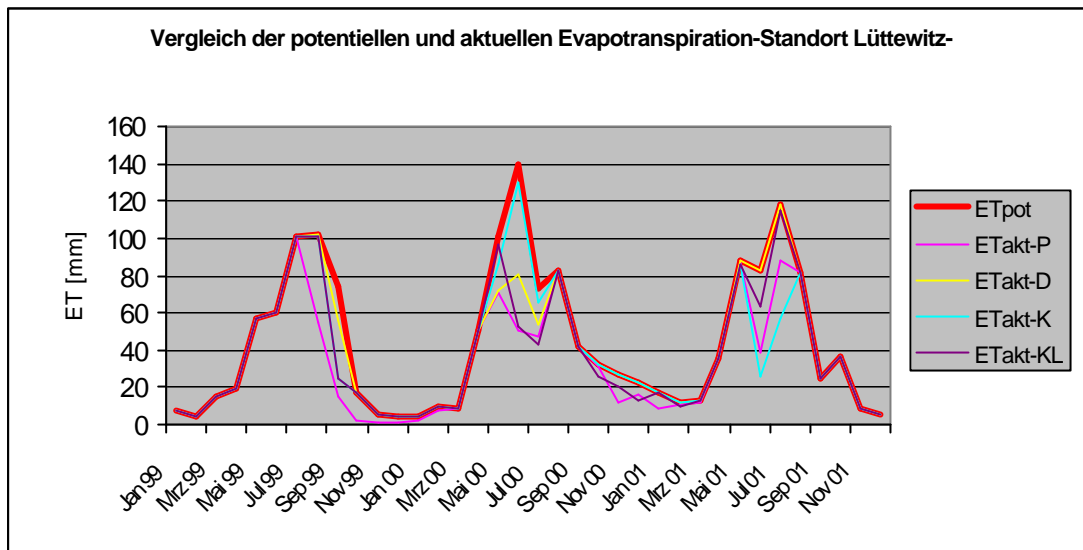


Abb. 37. Niederschläge des Jahres 2001 im Vergleich – Jahresniederschlag der Station Nossen (N), Station Lüttewitz (L), langjähriges (lj) Mittel der Station Nossen.

Insgesamt wurden durch die Klimastation Nossen in den 3 Untersuchungsjahren deutlich höhere Jahresniederschläge ermittelt. Die Unterschiede lagen in den einzelnen Jahren zwischen 60 - 180 mm Niederschlag. Außerdem wurden durch die Station Nossen in allen 3 Jahren höhere Durchschnittstemperaturen gemessen. Diese lagen zwischen 0,1 - 0,4 °C höher. Durch diese teilweise sehr großen Unterschiede wurde deutlich, wie relevant eine regionale Wetterstation für die Thematik einer Wasserhaushaltsbetrachtung ist.

Für die Berechnung der ETpot, welche in die KWB Eingang fand, wurde das Sättigungsdefizit der Klimastation Klein Mockritz verwendet. Für einen Vergleich wurden ebenfalls die berechneten Werte der ETpot der Station Nossen verwendet. In der Abb. 38 sind die Monatssummen der ermittelten potenziellen Evapotranspirationsraten der Stationen Klein Mockritz und Nossen gegenübergestellt. Zur besseren Übersichtlichkeit wird die Station Klein Mockritz im Text oder in den Abbildungen als Station Lüttewitz gekennzeichnet.

Die Werte der ETpot weichen teilweise deutlich voneinander ab (Abb. 38). Die Werte der Station Nossen lagen fast ausschließlich über denen der Station Lüttewitz. Nur im zweiten Halbjahr des Jahres 2001 glichen sich die Kurven. Im Durchschnitt waren die Werte der ETpot der Klimastation Nossen ca. 5 mm höher. Besonders deutlich wurden die Unterschiede in den Sommermonaten. Hier betrug die Abweichungen ca. 25 mm im Juli 1999, ca. 25 mm

im Juli 2000 und ca. 20 mm im Mai 2001. Die geringsten Werte der ETpot wurden jeweils von November bis Februar ermittelt. In diesen Monaten wäre zwar eine ausreichende Feuchtigkeit des Bodens gegeben, jedoch fehlt die Verdunstungskraft durch höhere Temperaturen. Im Jahr 2000 wurde bis in den Winter relativ hohe Werte der ETpot im Vergleich der 3 Jahre gemessen (Abb. 38).

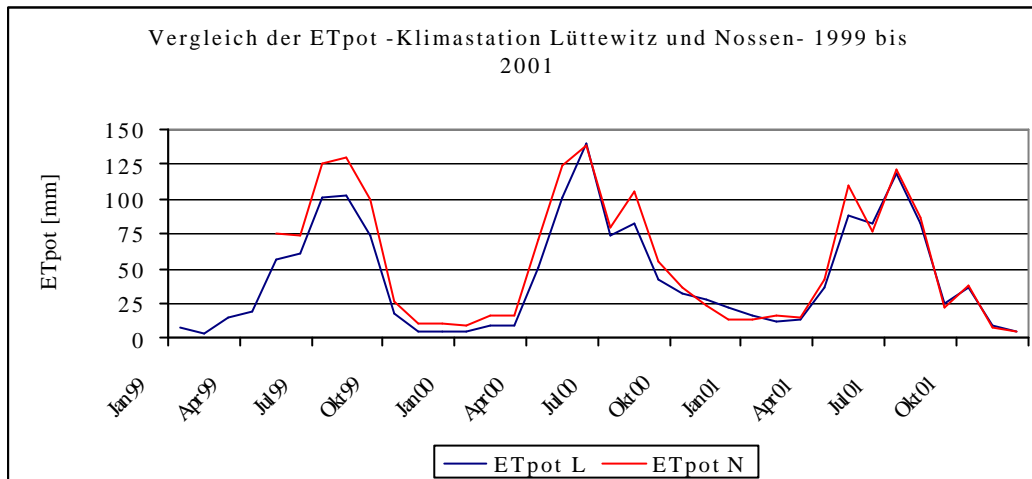


Abb. 38. Vergleich der ETpot der Klimastationen Lüttewitz und Nossen.

Für die Ermittlung der KWB auf dem Untersuchungsschlag wurde die ETpot verwendet. Außerdem wurde die ETakt ermittelt, um die errechneten Werte der ETpot bzw. der KWB relativieren zu können. In der Abb. 39 sind die ermittelten Monatssummen der ETpot und die jeweilige ETakt der entsprechenden Bodenbearbeitungsvariante dargestellt. Es wurde erkennbar, dass Abweichungen der ETakt zur ETpot vorrangig in den Sommermonaten auftraten. In dieser Zeit wirkte innerhalb der Berechnung zur ETakt die geringere Bodenfeuchte als limitierender Faktor.

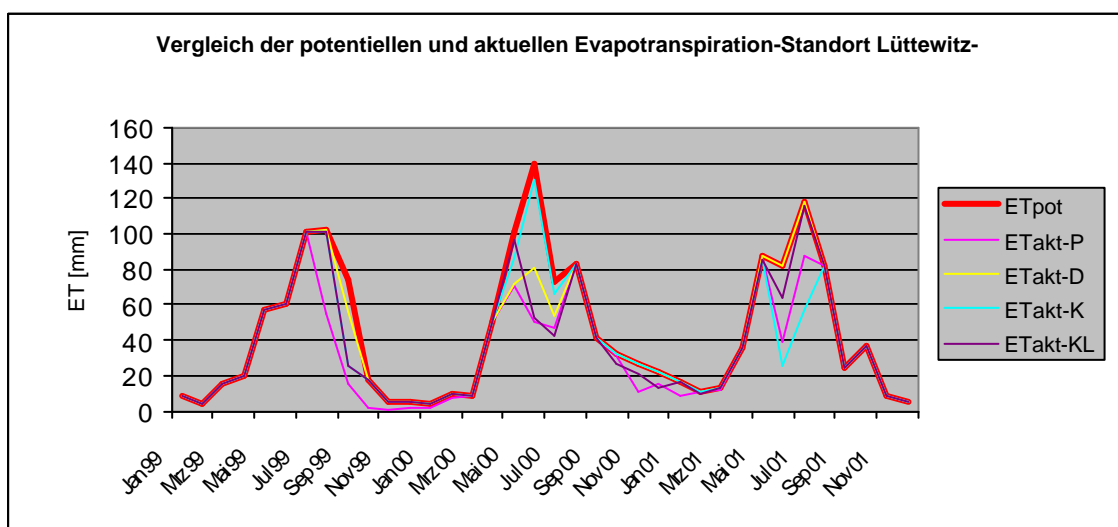


Abb. 39. Vergleich der ETpot und ETakt - Klimastation Lüttewitz.

Im Jahr 1999 traten Abweichungen zwischen der ETpot und ETakt erst in den zweiten Hälfte des Jahres auf. Dies ist durch ein feuchtes erstes Halbjahr begründet, wobei im Boden oft Werte nahe der FK erreicht wurden. Die Abweichungen in der zweiten Hälfte des Jahres 1999 verlaufen in den Varianten D, K und KL bis in den Oktober nahezu auf gleichem Niveau. In der Variante P traten die Abweichungen bis in den Dezember auf (Abb. 39). In den Jahren 2000 und 2001 waren Abweichungen in den Monaten Mai bis September erkennbar. Die Variante P wies 1999 und 2000 die größten Abweichungen zur ETpot auf. Dies war auf die geringeren Bodenfeuchten zurückzuführen. Diese Abweichungen betragen im Monatsmittel ca. 30 mm. Daraus muss geschlossen werden, dass die Sickerwassermengen wahrscheinlich noch höher waren als errechnet. Im Jahr 2001 wies die Variante P ebenfalls größere Abweichungen auf. Diese wurden jedoch durch die Abweichungen der Variante K übertroffen. Eine enge Übereinstimmung zwischen der errechneten ETpot und ETakt wies die Variante D auf, was auf die hohen Bodenfeuchten zurückzuführen war. Eine Ausnahme bildete das Jahr 2000, in welchem nur die Variante K eine enge Übereinstimmung aufwies.

Klimatische Wasserbilanz von 1999 bis 2001

Die KWB wurde aus den Niederschlagsdaten und den Werten der ETpot der Station Lüttewitz ermittelt. Durch die KWB konnte erkannt werden, welche Wassermengen in den einzelnen Monaten verbraucht bzw. dem Boden zugeführt wurden. In der Abb. 40 ist die errechnete KWB für die Jahre 1999 bis 2001 abgebildet. Dabei kennzeichnen die negativen Werte einen Wassermangel, die positiven Werte einen Wasserüberschuss.

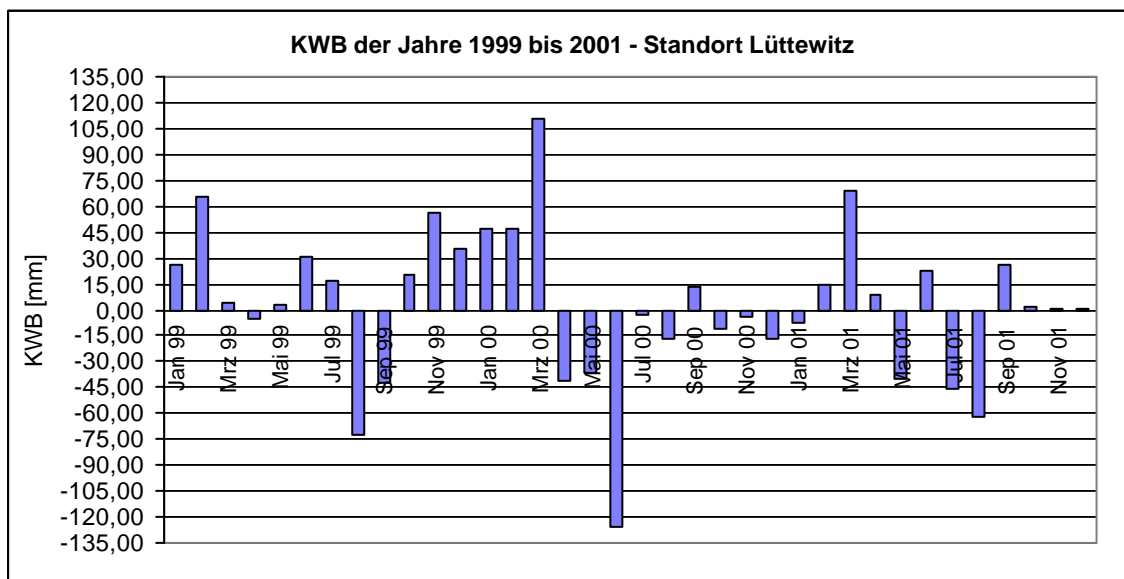


Abb. 40. KWB der Jahre 1999 bis 2001 – Station Lüttewitz.

Aus der Abb. 40 wird erkennbar, dass die einzelnen Jahre durch ganz unterschiedliche Verläufe geprägt waren. Die Wasserzufuhr erfolgte hauptsächlich in den Monaten Januar bis März. In den Jahren 1999 und 2001 war ebenfalls eine Wasserzufuhr in den Monaten Oktober bis Dezember zu verzeichnen. Ein erhöhter Entzug fand in allen 3 Jahren in den Monaten Juli bzw. August statt.

Im Jahr 1999 lag die Summe der KWB bei ca. 136 mm. Dieser Wert kennzeichnete eine deutliche Wasserzufuhr. In der Hauptwachstumszeit der Kulturpflanzen von Mai bis September wurde eine KWB von -64 mm ermittelt. In den Jahren 2000 und 2001 wurden für diese Zeitspanne wesentlich geringere Werte ermittelt. Die KWB für die Monate Mai bis Oktober lag bei ca. -45 mm und damit nach KA 4 (1994) in der Klasse gering.

Im Jahr 2000 lag die Jahressumme der KWB bei ca. -36 mm. Im Vergleich der 3 Untersuchungsjahre wies das Jahr 2000 die höchsten Entzüge an Wasser in der Jahresbilanz auf. Während der Monate Mai bis September wurde eine KWB von insgesamt -168 mm ermittelt. Durch diesen hohen negativen Wert in der Hauptwachstumszeit unterscheidet sich das Jahr 2000 deutlich von den anderen Varianten. Die KWB für die Monate Mai bis Oktober lag mit ca. -178 mm in der Klasse äußerst gering nach KA 4 (1994). Im Jahr 2000 fand eine deutliche Wasserzufuhr in den Monaten Januar bis März statt. Hier standen dem Boden ca. 200 l Wasser pro m² zur Verfügung.

Im Jahr 2001 lag die ermittelte KWB bei ca. -10 mm. Insgesamt kann die KWB dieses Jahres als ausgeglichen bezeichnet werden. Für die Hauptwachstumszeit von Mai bis September wurde eine KWB von ca. -98 mm ermittelt.

Allerdings muss angeführt werden, dass in die Bewertung der KWB nach KA 4 (1994) die mittleren jährlichen klimatischen Wasserbilanzen einfließen. Diese können teilweise erheblich von den einzelnen Jahren abweichen. Für das Mittelsächsische Lößhügelland wird nach KA 4 (1994) ein Wert von 100 - 200 für die mittlere jährliche KWB angegeben.

5.3.2 Bodenwasserhaushalt

5.3.2.1 Wassergehalt und Wasserspannung

Wassergehalt im Untersuchungszeitraum

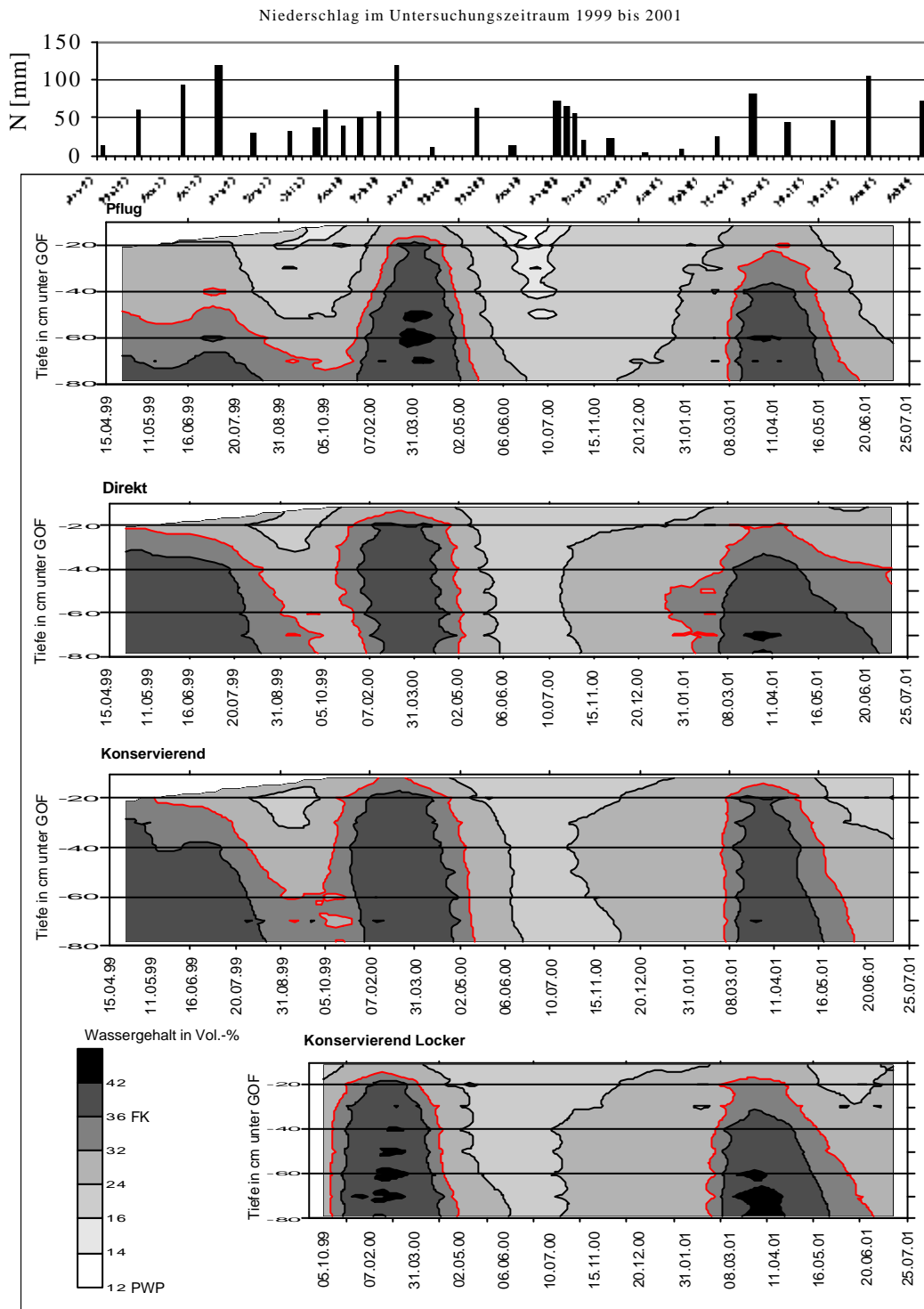


Abb. 41. Bodenwassergehalt der Varianten P, D, K und KL im Untersuchungszeitraum (Kennwerte des Bodenwasserhaushaltes: 36 Vol.-% Feldkapazität (FK), 12 Vol.-% permanenter Welkepunkt (PWP), rote Grenzlinie kennzeichnet den Wassergehalt von 32 Vol.-% bei pF 2,5; dargestellte Niederschläge entsprechen Monatssummen).

In der Abb. 41 ist der interpolierte Bodenwassergehalt dargestellt. Für das Jahr 1999 waren keine Daten zur Variante KL und für die Tiefe von 10 cm vorhanden. Als Interpolationsmethode wurde das Verfahren „Inverse Distance to a Power“ verwendet. Bei der Betrachtung ist auf die angegebenen Zeiträume auf der Abszisse zu achten. Da in Zeiten fehlender Messwerte die Werte interpoliert wurden, kann es zu diesen Terminen zu Verzerrungen kommen. Für die Erfassung der generellen Wassergehaltsänderungen im Profil, ist diese Darstellung aber sehr gut geeignet.

Für die dargestellten Grenzen (Abb. 41) wurden Werte nach KA 4 (1994) entsprechend der ermittelten Bodenart Ut4 verwendet. Die FK wurde für den Untersuchungsschlag in der Abb. 41 mit 36 Vol.-% angesetzt. Für den Untersuchungsschlag wurde ein Totwasseranteil von 12 Vol.-% ermittelt. Für die Sickerwasserberechnung wurde jedoch eine an Feldbedingungen angepasste FK gewählt.

Tatsächlich finden auch bei Gehalten unter FK Sickerprozesse statt. Zur Einschätzung des langsam beweglichen Sickerwassers (pF 1,8 – 2,5) wurde der Wassergehalt von 32 Vol.-% bei pF 2,5 als rote Linie im Diagramm dargestellt. Die in der Abb. 41 angegebenen Bereiche können zur Bewertung als Sickerwasser (> 36 Vol.-%), „leicht pflanzenverfügbares Wasser“ (36 - 32 Vol.-%), „mittel pflanzenverfügbares Wasser“ (32 - 24 Vol.-%), „schwer pflanzenverfügbares Wasser“ (24 - 12 Vol.-%) sowie Totwasser (< 12 Vol.-%) bezeichnet werden (KA 4, 1994).

Das Jahr 1999

Im Jahr 1999 war das Frühjahr sehr trocken, dagegen der Herbst und der Winter sehr feucht. Seit dem Beginn der Wassergehaltmessungen im April 1999 war die Variante P bis in die Tiefe von ca. 50 cm trockener als die Varianten D und K (Abb. 41). Bis Mitte Juli wies die Variante P einen Wassergehalt zwischen 24 - 32 Vol.-% bis 50 cm Tiefe auf. Im Frühjahr bis Mitte Juli lagen die Werte in den Variante D und K höher. Hier wurden in diesem Zeitraum unter 30 cm Tiefe Werte größer der FK ermittelt. Nur in den Tiefen bis ca. 25 cm wiesen die Varianten D und K ebenso geringe Wassergehalte auf, welche in der Variante P bis in 50 cm Tiefe zu finden waren. Die nichtgepflügten Varianten waren besonders in der Tiefe unter 30 cm feuchter.

Nach dem trockenen Frühjahr war durch die Starkniederschläge im Juni und Juli 1999 ein Ansteigen des Wassergehaltes in 50 cm Tiefe in der Variante P und in 40 cm Tiefe, entspre-

chend der Tiefe der Austrocknung, in den Varianten D und K zu verzeichnen. Das Ansteigen der Wassergehalte im Boden nach den hohen Niederschlägen war in der Variante D nur sehr gering wahrnehmbar.

In den Varianten D und K wurden bis Mitte August 1999 Wassergehalte über 32 Vol.-% bis in 40 cm Tiefe ermittelt. Ab 40 cm Tiefe wurden in den Varianten D und K bis Mitte Juli Werte höher der FK gemessen. In diesen Zeiträumen stand den Pflanzen ausreichend Wasser in diesen Bodentiefen zur Verfügung. In der Variante P wurden nur in der Tiefe 70 - 80 cm bis Mitte Juli Werte größer der FK ermittelt. Nach den hohen Niederschlägen im Juni und Juli 1999 folgten ein sehr trockener August und September. In der Variante P trocknet in diesem Zeitraum der Boden bis in 50 cm Tiefe auf Wassergehalte zwischen 16 - 24 Vol.-% aus. Damit war das Wasser für die Kulturpflanzen in diesem Zeitraum schwer verfügbar. In der Tiefe bis 20 cm wurden im August und September sogar Wassergehalte unter 16 Vol.-% erreicht (Abb. 41). Im Bereich von 60 cm Tiefe lagen die Wassergehalte in der Variante P zwischen 24 - 32 Vol.-%. In der Tiefe unter 70 cm wurden Wassergehalte über 32 Vol.-% ermittelt.

In den Varianten D und K fanden ebenfalls diese Austrocknungen nach der langen Trockenperiode statt. Von 30 cm bis in 50 cm Tiefe wurden jedoch höhere Wassergehalte als in der Variante P gemessen. Diese lagen in den beiden nicht gepflügten Varianten bei 24 - 32 Vol.-%, wogegen in der Variante P in der vergleichbaren Tiefe 16 - 24 Vol.-% vorlagen. Somit war das Wasser in dieser Bodentiefe für die Pflanzen in den nichtgepflügten Varianten wesentlich leichter verfügbar. Im August und September 1999 fanden jedoch auch in den Varianten D und K bis in 30 cm Tiefe Austrocknungen auf Wassergehalte zwischen 16 - 24 Vol.-% statt. Jedoch muss berücksichtigt werden, dass die Wassergehalte in diesem Bereich der Variante P bei unter 16 Vol.-% lagen. Während in der Variante P die Bodenschichten bis 50 cm im Spätsommer und Herbst wesentlich trockener waren, trocknete die Variante D unter 70 cm am stärksten aus. In der Variante P wurden in dieser Tiefe noch Werte über 32 Vol.-% erreicht, wogegen die Werte in der Variante D bei 24 - 32 Vol.-% lagen. Dieser Wert kennzeichnet immer noch pflanzenverfügbare Wassergehalte.

Die höchsten Wassergehalte in diesem trockenen Spätsommer und Herbst wies die Variante K auf. Bis in die Tiefe von 60 cm lagen hier die Wassergehalte bei 24 - 32 Vol.-%, in der Tiefe darunter bei über 32 Vol.-%. Nur linsenartig traten in der Tiefe unter 60 cm in kurzen Zeiträumen Wassergehalte zwischen 24 - 32 Vol.-% auf. Diese Gehalte kennzeichneten eine aus-

reichende Wasserversorgung, aber auch gleichzeitig ein Sickerwasserpotenzial in diesen Bodentiefen.

Das Jahr 2000

Durch die hohen Niederschläge von November 1999 bis März 2000 kam es in allen Varianten und Bodentiefen zu einer Aufsättigung (Abb. 41). Im Niederschlagsgeschehen fiel besonders der März mit Niederschlägen von 120 mm auf. In den nichtgepflügten Varianten erfolgte die Aufsättigung der oberen Bodenschichten in diesem Zeitraum schneller als in der Variante P. Dies ist in der nicht so starken Austrocknung begründet. In allen Varianten waren unter 40 cm Tiefe Wassergehalte größer der FK bis in den April zu verzeichnen. In den Varianten P und KL wurden teilweise Wassergehalte über 42 Vol.-% ermittelt. Im Monat Mai war die Variante P in der Tiefe 40 bis 80 cm deutlich feuchter als die Variante KL. Die Variante P wies in diesen Tiefen Gehalte über 32 Vol.-% auf, wogegen in der Variante KL die Werte zwischen 24 - 32 Vol.-% lagen. In der Schicht über 20 cm trockneten alle Varianten im Frühjahr und zu Beginn des Sommers 2000 gleich schnell und gleich stark aus. Die nichtgepflügte Variante K war jedoch von Mitte Mai bis Mitte Juni 2000 in der Schicht 30 - 60 cm deutlich feuchter als die anderen Varianten in dieser Bodenschicht. In der Variante K wurden Gehalte zwischen 24 - 32 Vol.-% ermittelt. Das Frühjahr des Jahres 2000 war deutlich feuchter als das des Vorjahres. In den Monaten Juni und Juli konnte eine ausgeprägte Trockenheit verzeichnet werden. Aufgrund diesen Umstandes kommen die Vorteile der nichtgepflügten Varianten in Bezug auf den Wasserhaushalt zum Vorschein.

In allen Varianten war im Sommer bis in den Herbst eine Austrocknung aller Bodenschichten, in 80 cm Tiefe sogar auf einen Wassergehalt von 16 - 24 Vol.-%, zu verzeichnen. In der Variante P fand im Juni und Juli bis in die Tiefe von 40 cm eine Austrocknung unter 16 Vol.-% statt. In der Tiefe bis 20 cm wurden in diesem Zeitraum sogar Gehalte unter 14 Vol.-% Wasser erreicht. Diese Werte kennzeichnen schwer pflanzenverfügbares Wasser. In den drei nichtgepflügten Varianten fand diese starke Austrocknung nicht statt.

Nach den Niederschlägen Ende Juli, im August und September 2000, erfolgte eine Aufsättigung der Bodenschichten unter 20 cm auf 24 - 32 Vol.-% in den nichtgepflügten Varianten (Abb. 41). Dies konnte in der Variante P nicht beobachtet werden. Bis in den Januar 2001 blieben hier unter der Tiefe von 40 cm Wassergehalte von 16 - 24 Vol.-% erhalten. In der Variante D erfolgte die Aufsättigung in der Tiefe am schnellsten. In der Variante D wurde in der Tiefe von 50 - 70 cm zuerst ein Wassergehalt über 32 Vol.-% erreicht. In der Variante K blieb im Unterboden, länger als in den Varianten D und KL, ein Wassergehalt von

16 - 24 Vol.-% erhalten. In der Variante D wurde bereits Anfang Januar 2001 in der Tiefe von 50-70 cm ein Wassergehalt über 32 Vol.-% ermittelt. Bereits im Februar 2001 waren die Tiefen über 70 cm Bodentiefe in der Variante D mit Wassergehalten größer 32 Vol.-% aufgesättigt. In den anderen Varianten wurden in der Tiefe 20 - 80 cm Wassergehalte über 32 Vol.-% erst Anfang März erreicht.

Das Jahr 2001

Im Jahr 2001 gestalteten sich der Januar und Februar trockener als in den Vorjahren. Weiterhin war besonders der April sehr regenreich. Die Variante D blieb in den Tiefen unter 40 cm länger feuchter als die anderen Varianten. In der Variante D wurden seit der Aufsättigung im Januar 2001 bis in den Juli 2001 Wassergehalte höher 32 Vol.-% gemessen (Abb. 41). Besonders in den Tiefen unter 60 cm wurden deutlich länger, bis in den Juni, Wassergehalte höher der FK ermittelt. Dies kennzeichnet hier ein Sickerwasserpotential. Es wurde erkennbar, dass durch ein feuchtes Frühjahr die Varianten K und KL in den obersten 20 cm länger feucht blieben. In den Tiefen 10 - 20 cm lagen Wassergehalte größer 32 Vol.-% vor. In der Variante K wurden in diesem Zeitraum unter 20 cm Tiefe Werte höher der FK gemessen. Diese hohen Werte wurden in den anderen Varianten erst in Tiefen ab 35 - 40 cm gemessen. Im Profilverlauf des Wassergehaltes unter 20 cm Tiefe ähnelte die Variante P der Variante KL (Abb. 41). Nur in der Tiefe 60 - 80 cm wies die Variante KL deutlich höhere Wassergehalte im Vergleich zu den anderen Varianten auf. Diese lagen in diesem Zeitraum bei Gehalten über 42 Vol.-%.

Im Juli 2001 waren nur geringe und im August sehr geringe Niederschlagswerte zu verzeichnen. Ab Mitte Mai war in allen Varianten eine Verringerung der Wassergehalte auf 16 - 24 Vol.-% zu erkennen. In der Variante P erfasste diese Verringerung bis Ende Juli Bodentiefen bis 60 cm. Unter 60 cm lagen Wassergehalte zwischen 24 - 32 Vol.-% vor. In der Variante D betraf diese Austrocknung nur die obersten 10 cm und auch nur bis Mitte Juni. In der Variante K waren von dieser Austrocknung nur die obersten 35 cm bis Ende Juli betroffen. In der Variante KL wurde diese Verringerung der Wassergehalte bis in 30 cm Tiefe gemessen. Jedoch wurde Ende Juli 2001 wieder eine Aufsättigung der obersten 30 cm auf Wassergehalte zwischen 24 - 32 Vol.-% verzeichnet.

In den Varianten K und KL lagen unter der erwähnten Austrocknungstiefe bis Ende Juli Wassergehalte über 24 Vol.-% vor, womit das Wasser für die Kulturpflanzen mäßig verfügbar war. Die Variante P trocknete somit deutlich tiefer aus. Die Variante D wies im Frühjahr und im Sommer 2001 durchgehend hohe Gehalte, über 32 Vol.-%, in der Tiefe unter 40 cm auf.

Da eine Sickerwasserberechnung für die Ebenen 30 cm, 60 cm und 80 cm erfolgte, sollen diese im Anschluss betrachtet werden.

Die Ebene 30 cm

In der Abb. 42 sind die ermittelten Wassergehalte der 4 Bodenbearbeitungsvarianten in der Ebene 30 cm im Untersuchungszeitraum dargestellt.

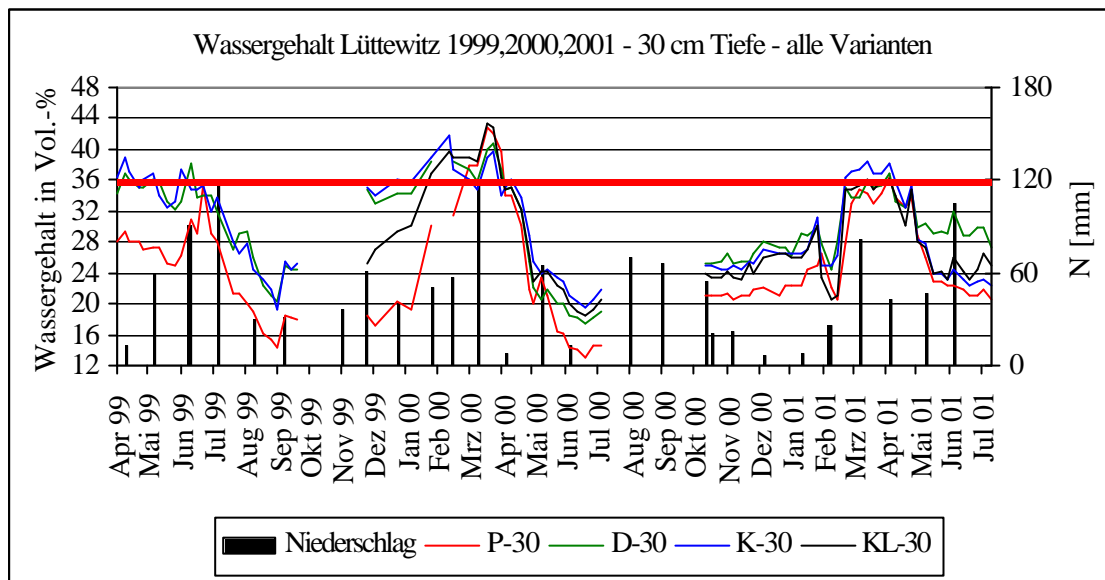


Abb. 42. Wassergehalt der Ebene 30 cm in den Jahren 1999 bis 2001.

Die in Abb. 42 dargestellte rote Linie kennzeichnet die FK von 36 Vol.-% nach KA 4 (1994). Die Variante P wies von Beginn der Messungen im April 1999 bis in den Februar 2001 fast ausschließlich die geringsten Wassergehalte dieser Tiefe auf. Nur im Januar bis Anfang April 2000 und im April 2001 wurden in der Variante P Werte höher als FK verzeichnet. Im Frühjahr 1999 lagen die Werte bei 24 - 28 Vol.-%. In den nichtgepflügten Varianten lagen im April und stellenweise im Mai Werte höher der FK vor. Nach den starken Niederschlägen im Juni und Juli 1999 erfolgte in allen Varianten eine Aufsättigung. Hierbei wurden im Juni in den nichtgepflügten Varianten in dieser Ebene Werte höher der FK erreicht (Abb. 42). In der Variante P wurde aufgrund des vorher geringeren Wassergehaltes ein größerer Sprung verzeichnet. Der höchste Wert, welcher nur gering unter der FK lag, wurde in der Variante P zeitlich versetzt zu den Varianten D und KL ermittelt.

Durch den sehr trockenen August und September 1999 war anschließend in allen Varianten ein Rückgang der Wassergehalte zu verzeichnen. Zwischen den Varianten D und K waren dabei keine Unterschiede erkennbar. Der geringste Wassergehalt wurde dabei in allen Varianten Mitte September erreicht. Zu diesem Tiefststand betrug der Unterschied im Wassergehalt zwischen den nichtgepflügten Varianten und der Variante P ca. 4 Vol.-%.

Der zweite Messzeitraum zur Wassergehaltsuntersuchung begann im Dezember 1999. Von Dezember 1999 bis Ende Januar 2000 konnte ein Ansteigen des Wassergehaltes in allen Varianten verzeichnet werden (Abb. 42). Hierbei wurden in den Varianten D und K die höchsten Wassergehalte ermittelt. Diese erreichten im Januar Werte über FK. Auch in der Variante KL wurden im Januar Werte über FK ermittelt.

In der Variante P stellte sich erst zeitlich versetzt, nach den hohen Niederschlägen im März, eine Aufsättigung über FK ein. Nach den hohen März-niederschlägen erfolgte in allen Varianten eine nochmalige Aufsättigung. Dabei wurden in den Varianten P und KL die höchsten Werte von 42 Vol.-% erreicht. Im April konnte in allen Varianten eine Verringerung des Wassergehaltes verzeichnet werden. Während des Abfallens des Wassergehaltes wies die Variante K die höchsten und die Variante P die geringsten Wassergehalte auf. Die Unterschiede waren aber gering. Es war erkennbar, dass im Frühjahr 2000 keine entscheidenden Wassergehaltsunterschiede zwischen den Varianten zu verzeichnen waren. Durch den sehr trockenen Juni wurden die geringsten Wassergehalte in allen Varianten Ende Juni erreicht. Dabei besaß die Variante K mit 20 Vol.-% den deutlich höchsten Wassergehalt. Die Variante P wies mit unter 14 Vol.-% Wassergehalt den geringsten Wassergehalt in 30 cm Tiefe auf (Abb. 42).

Die dritte Messperiode begann im Oktober 2000. Von Oktober 2000 bis in den Februar 2001 wurden in der Variante P wesentlich geringere Wassergehalte im Vergleich zu den 3 nichtgepflügten Varianten gemessen. Die Unterschiede zu den Varianten D, K und KL betrugen in der Tiefe 30 cm ca. 4 Vol.-%. Im Februar konnte nochmals eine Verringerung der Wassergehalte in allen Varianten verzeichnet werden. Hier glichen sich alle Varianten. Durch die hohen Niederschläge im März fand eine Aufsättigung in allen Varianten statt. Während dieser Aufsättigung waren nur geringe Unterschiede im Wassergehalt zwischen den Varianten zu verzeichnen. Die Variante P wies hier geringere Wassergehalte auf. Die höchsten Wassergehalte wurden im Zeitraum Februar bis April erreicht. Nur in der Variante K wurde hier eine Überschreitung der FK ermittelt.

Ende April bis Juni 2001 begann in allen Varianten eine Verringerung des Wassergehaltes. Während dieser Verringerung trat die Variante D mit deutlich höheren Gehalten hervor. Die Unterschiede lagen im Bereich von ca. 5 Vol.-%. Im Mai und Juni 2001 wies die Variante P wieder die geringsten Wassergehalte auf. Diese lagen im Bereich 20 - 24 Vol.-% und kennzeichneten damit schwer pflanzenverfügbares Wasser. Durch die hohen Juniniederschläge war zeitweise ein Ansteigen der Wassergehalte in allen Varianten zu beobachten (Abb. 42).

Die Ebene 60 cm

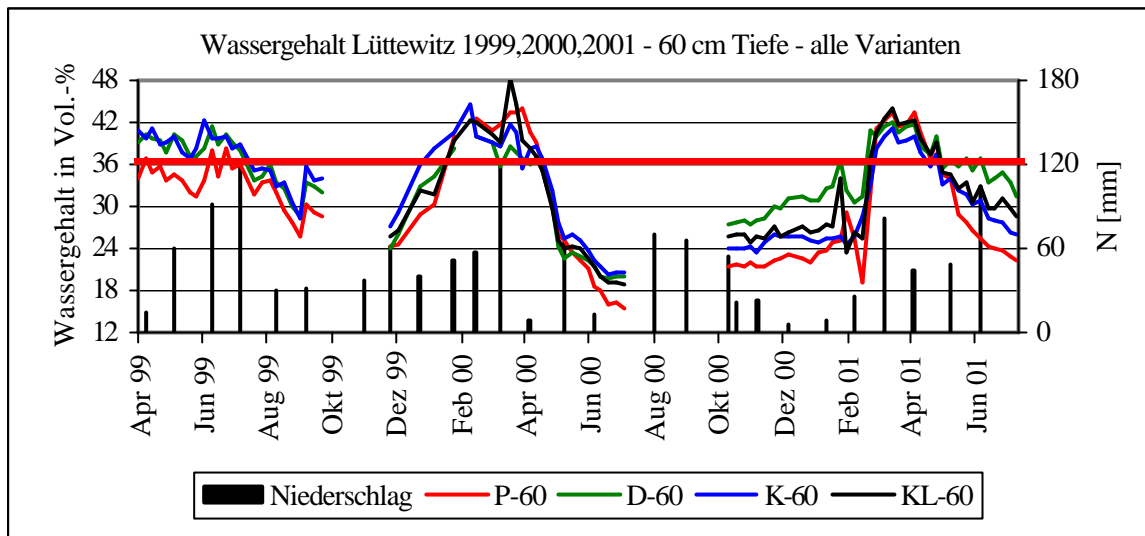


Abb. 43. Wassergehalt der Ebene 60 cm der Jahre 1999 bis 2001.

In der Abb. 43 sind die Wassergehalte der Ebene 60 cm dargestellt. Der Kurvenverlauf der Ebene 60 cm ist dem Verlauf der Kurven der 30 cm Ebene sehr ähnlich. Im Vergleich zur 30 cm Ebene lagen die Wassergehalte allgemein höher. Von April bis Juni 1999 lagen die Wassergehalte der nichtgepflügten Varianten deutlich über FK. In der Variante P wurde der Wert der FK erst nach den starken Niederschlägen im Juni und Juli überschritten. Durch den trockenen August und September war in allen Varianten eine Verringerung der Wassergehalte zu verzeichnen. Dabei lagen die Werte der nichtgepflügten Varianten ca. 1-2 Vol.-% höher als die der Variante P. In den trockenen Spätsommermonaten wies die Variante K stellenweise noch höhere Wassergehalte als die Variante D auf. Die geringsten Wassergehalte wurden im September erreicht. Dabei lagen die Wassergehalte in 60 cm Tiefe in der Variante P bei ca. 26 Vol.-% und in den nichtgepflügten Varianten bei ca. 29 Vol.-%.

In der zweiten Messperiode wies die Variante K von Beginn an bis in den Februar 2000 die höchsten Wassergehalte im Vergleich der Varianten auf (Abb. 43). Die Unterschiede waren hier deutlicher ausgeprägt als in der 30 cm Ebene. In der Variante K wurde bereits Anfang Januar die FK überschritten. In den Varianten P, D und KL erfolgte die Überschreitung der FK Anfang Februar. Bis in den Mai 2000 lagen die Wassergehalte in allen Varianten über FK, wobei die Varianten P und KL mit deutlich erhöhten Werten herausragten. Im Mai und Juni fielen die Wassergehalte aller Varianten sehr stark ab, wobei durch die geringen Niederschläge im Juni der Tiefststand erreicht wurde. Hier hob sich die Variante P mit den geringen Wassergehalten um 16 Vol.-% deutlich von den nichtgepflügten Varianten ab. Dieses Wasser war somit in der Tiefe 60 cm für die Kulturpflanzen schwer verfügbar. In den nichtgepflügten

wurden Wassergehalte von 20 Vol.-% ermittelt. Dieses Wasser ist ebenfalls noch schwer pflanzenverfügbar. Die Variante K wies in der Ebene 60 cm in diesem trockenem Juni die höchsten Wassergehalte auf.

Von Beginn der dritten Messperiode im Oktober 2000 wies die Variante P bis in den Februar die geringsten Gehalte in 60 cm Tiefe auf (Abb. 43). Die deutlich höchsten Wassergehalte wurden in der Variante D gemessen. Diese lagen ca. 4 Vol.-% über den anderen nichtgepflügten Varianten und ca. 8 Vol.-% über der Variante P. Von Oktober bis in den März war in allen Varianten ein Ansteigen des Wassergehaltes zu verzeichnen. Im Februar 2001 war in allen Varianten nochmals ein deutlicher Rückgang des Wassergehaltes erkennbar. Dies ist durch die geringen Niederschläge des Februar 2001 zu erklären. Ende Februar bis Mitte Mai wurde, besonders durch die hohen Niederschläge im März, in allen Varianten die FK überschritten. Trotz der hohen Niederschläge im Mai und Juni fand in diesen Monaten ein Rückgang des Wassergehaltes statt. Dies ist im Wasserverbrauch der Kulturpflanzen und der erhöhten Verdunstung begründet. Die Variante P hob sich hier mit mindestens 4 Vol.-% geringeren Wassergehalte von den anderen Varianten ab. Im Juni 2001 wurden in der Tiefe 60 cm in der Variante P 24 Vol.-%, in der Variante K 28 Vol.-%, in der Variante KL 30 Vol.-% und in der Variante D sogar noch über 32 Vol.-% ermittelt. Damit war das Wasser dieser Tiefenstufe in den konservierenden Varianten deutlich leichter pflanzenverfügbar.

Die Ebene 80 cm

In der Abb. 44 sind die Wassergehalte der Ebene 80 cm dargestellt.

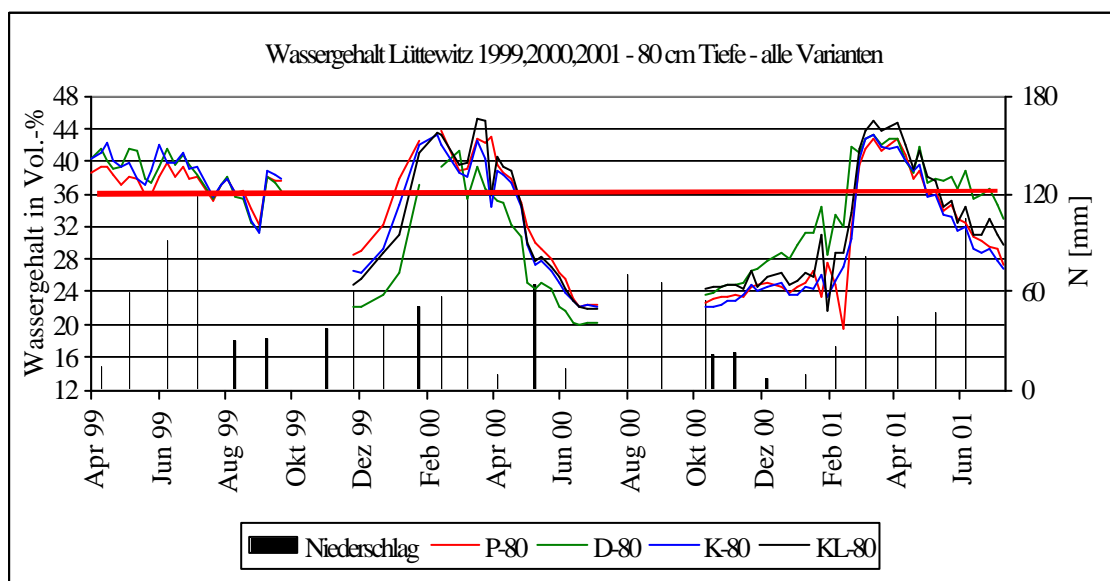


Abb. 44. Wassergehalt der Ebene 80 cm der Jahre 1999 bis 2001.

In der Ebene 80 cm bot besonders in den Jahren 2000 und 2001 ein anderes Bild als in den Ebenen 30 cm und 60 cm (Abb. 44). Im Messzeitraum 1999 lagen die Wassergehalte aller 3 Varianten von April bis zum August 1999 über FK. Dabei wies die Variante P teilweise geringere Gehalte auf. Durch die trockenen Monate August und September 1999 sank danach der Wassergehalt in allen Varianten auf 32 Vol.-%. Damit war der geringste Wassergehalt im Messzeitraum 1999 erreicht. Im Oktober 1999 war eine Aufsättigung zu verzeichnen. Ab Mitte Juli 1999 waren kaum Unterschiede zwischen den Varianten zu erkennen (Abb. 44).

Von Dezember 1999 bis Ende Januar 2000 wies die Variante P die höchsten Wassergehalte im Vergleich der Varianten auf. Die Wassergehalte lagen gegenüber den anderen Varianten 2 - 4 Vol.-% höher. Die Variante P erreichte als erste Variante Wassergehalte höher der FK (Abb. 44). In diesem Zeitraum wies die Variante D die geringsten Wassergehalte auf. Von Januar bis in den Mai 2000 wurden in allen Varianten Wassergehalte höher der FK ermittelt. Von Mai bis in den Juli fand in allen Varianten eine Verringerung der Wassergehalte statt. Die Variante D wies im Durchschnitt einen um 1-2 Vol.-% geringeren Wassergehalt als die anderen Varianten während dieser Austrocknungsphase auf. Die Variante P besaß stellenweise die höchsten Wassergehalte. Im Juli 2000 lagen die gemessenen Gehalte in den Varianten P, K und KL bei 22 Vol.-%. Die Wassergehalte der Variante D bewegten sich in diesem Zeitraum um 20 Vol.-%. Im Gegensatz dazu wies die Variante P in den Ebenen 30 cm und 60 cm meist die geringsten Wassergehalte auf.

Ebenfalls war im Messzeitraum 2001 ein verändertes Bild zu erkennen. In den Tiefen 30 cm und 60 cm wies die Variante P größtenteils die geringsten Wassergehalte auf (Abb. 42, Abb. 43). In der Ebene 80 cm bewegten sich die Gehalte der Variante P im Mittel der Varianten. Im November 2000 lagen die Wassergehalte in allen Varianten bei ca. 24 Vol.-%. Bis Anfang April fand in allen Varianten eine Aufsättigung in der Bodenschicht 80 cm statt. Die Variante D wies im Messzyklus 2001 die höchsten Wassergehalte auf. Die Unterschiede zu den anderen Varianten lagen bei 1-2 Vol.-%. Von Ende Februar bis Mai 2001 konnten in 80 cm Tiefe in allen Varianten Wassergehalte höher der FK ermittelt werden. In der Variante D wurden diese Gehalte noch bis in den Juni gemessen.

Bei der Betrachtung der Kurven aller Tiefen (Daten nicht dargestellt) in den einzelnen Untersuchungsjahren wurde erkennbar, dass in den Varianten P und KL zwischen allen einzelnen Ebenen unter 20 cm Tiefe die Unterschiede im Wassergehalt relativ gleichmäßig bei 1-2 Vol.-% lagen. In der Variante P war ein homogenes Bild zwischen den einzelnen Ebenen

ausgebildet. In den Varianten D und K sind diese relativ homogenen und größeren Gradienten nur bis ca. 30 cm ausgebildet, darunter liegen die Wassergehalte der einzelnen Tiefen sehr eng beieinander.

In der Ebene 10 cm waren von 2000 bis 2001 geringe Unterschiede im Wassergehalt zwischen den Bearbeitungsvarianten zu erkennen (Daten nicht dargestellt). Im Frühjahr 2000 lagen die Gehalte in der Ebene 10 cm in allen Varianten bei ca. 30 Vol.-%. Ähnliche Gehalte wurden auch im Frühjahr 2001 gemessen. In der Ebene 20 cm waren die Unterschiede im Wassergehalt zwischen den Varianten deutlicher ausgeprägt. Bis auf wenige Ausnahmen lagen die Wassergehalte der Variante P ca. 3 % unter den Wassergehalten der nichtgepflügten Varianten. Im Frühjahr 2001 lagen die Wassergehalte der Varianten D und KL in 20 cm Tiefe bei 33 Vol.-%. In der Variante K wurden Werte über FK ermittelt. Wogegen in der Variante P in diesem Zeitraum Gehalte von 30 Vol.-% gemessen wurden (Daten nicht dargestellt).

Wasserspannung im Untersuchungszeitraum

Für die Ebenen 30 cm, 60 cm und 80 cm sind in den Abb. 49, Abb. 50 und Abb. 51 die ermittelten Saugspannungen dargestellt. Die Saugspannung ist nach KA 4 (1994) die Spannung, mit welcher Wasser im Boden gebunden ist. Der pF-Wert ist das Maß für die Saugspannung und stellt den dekadischen Logarithmus des ermittelten Wertes dar. Die markanten Punkte FK, nFK und PWP kennzeichnen bei einer statischen Betrachtungsweise den Wasserhaushalt. Die ökologischen Grenzen liegen für leicht pflanzenverfügbares Wasser bei pF 1,8 – 2,3, für schwer pflanzenverfügbares Wasser bei pF 2,3 – 4,2 sowie für Totwasser bei pF > 4,2.

Die Ebene 30 cm

In der Abb. 49 sind die ermittelten Wassergehalte für die Tiefe 30 cm dargestellt. Die rote Linie kennzeichnet die Saugspannung von pF 1,8.

Die Monate März und April waren im Jahr 1999 sehr trocken. Dies war in allen 3 Varianten durch erhöhte Saugspannungen nachvollziehbar (Abb. 45). Von April bis in den Juli wurden hauptsächlich Saugspannungen höher als pF 1,8 gemessen. Kurzzeitig wurden in den Varianten D und K Saugspannungen unter pF 1,8 erreicht. Im Frühjahr 1999 wurden in der Variante P die höchsten Saugspannungen in 30 cm Tiefe gemessen. Diese lagen bis in den Juni bei pF 2,3 und damit höher als in den nichtgepflügten Varianten. In der Variante P wurde in der Ebene 30 cm bereits Anfang Juni die Stufe von schwer pflanzenverfügbarem Wasser erreicht. In der Variante K wurde dies deutlich später und in der Variante D nicht erreicht. Durch die

hohen Niederschläge im Juni und Juli 1999 fand eine Verringerung der Saugspannungen in allen Varianten statt. Während dieses Rückganges waren keine Unterschiede zwischen den Varianten erkennbar. Im Juli 1999 wurde die geringste Wasserspannung ermittelt. Diese waren in der Variante P deutlich geringer. Dieser Tiefstand kennzeichnet jedoch nur einen einzigen Messtermin. Trotz der hohen Juliniederschläge stiegen die Saugspannungen im Juli wieder stark an. Durch den trockenen August und September wurde dies noch verstärkt. Von Juli bis zum Ende der Messperiode im September 1999 waren keine Unterschiede innerhalb der Wasserspannungen zwischen den Varianten zu verzeichnen. Zwischen Ende Juli und September lagen die Saugspannungen in allen Varianten über pF 2,4 und kennzeichneten damit schwer pflanzenverfügbares Wasser.

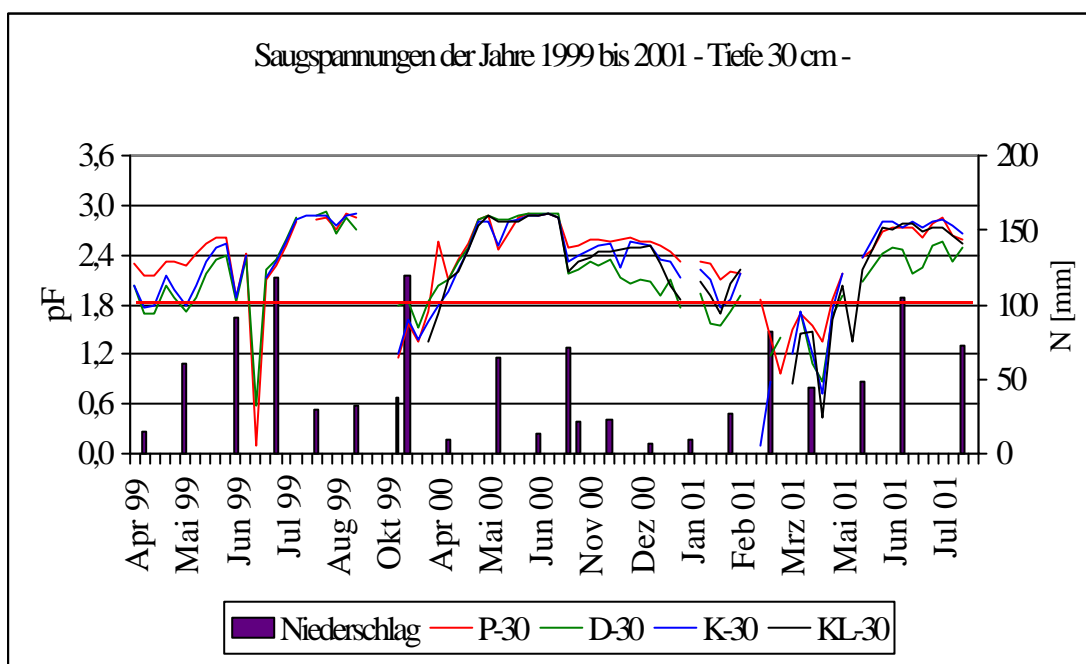


Abb. 45. Saugspannungen in der Tiefe 30 cm von 1999 bis 2001

Aufgrund der hohen Niederschläge wurden im März 2000 in allen Varianten Saugspannungen unter pF 1,8 ermittelt. Dies ermöglichte eine Versickerung aus dieser Ebene. Ab Mitte März fand in allen Varianten ein Ansteigen der Wasserspannungen statt. In den Varianten P und D wurden zuerst pF -Werte über pF 1,8 erreicht. Anfang April wies die Variante P kurzzeitig die höchsten Wasserspannungen auf. Die Werte lagen im Bereich von schwer pflanzenverfügbarem Wasser. Bis zum Ende der Messperiode im Juni 2000 blieben die Saugspannungen in allen Varianten im Bereich schwer pflanzenverfügbares Wasser. Durch die hohen Mainiederschläge fand kurzzeitig eine Verringerung der pF -Werte in den Varianten P und K statt. Größere Unterschiede zwischen den Saugspannungen der Bearbeitungsvarianten waren im Frühjahr und Sommer 2000 nicht zu erkennen. Durch die relativ hohen Niederschläge im August und September 2000 wurde eine Verringerung der pF -Werte in allen Varianten gemessen. Im

Herbst 2000 wies die Variante P die höchsten Saugspannungen auf. Jedoch lagen die Werte der Varianten K und KL nur geringfügig darunter und im Bereich von schwer pflanzenverfügbarem Wasser. In der Variante D lagen die gemessenen Werte im Bereich von leicht pflanzenverfügbarem Wasser.

Die Variante D unterschritt als erste Variante im Januar 2001 die Grenze pF 1,8. In den Varianten K und KL geschah dies im Februar und in der Variante P im März 2001. Durch den trockenen Januar und Februar 2001 stiegen in allen Varianten die pF-Werte Ende Januar an. Durch die hohen Niederschläge lagen im März die gemessenen pF-Werte aller Varianten unter pF 1,8. Dies war bis in den April in allen Varianten gegeben, wobei keine größeren Unterschiede zwischen den Bodenbearbeitungsvarianten zu verzeichnen waren. Im Mai und Juni 2001 stiegen die Saugspannungen in allen Varianten. Dabei wies die Variante D im Vergleich der Varianten deutlich geringere Saugspannungen auf. Diese lagen teilweise im Bereich von leicht pflanzenverfügbarem Wasser, wogegen die gemessenen pF-Werte der anderen Varianten in den Bereich von schwer pflanzenverfügbarem Wasser fielen (Abb. 45).

Die Ebene 60 cm

In der Abb. 46 sind die ermittelten Saugspannungen der Ebene 60 cm dargestellt.

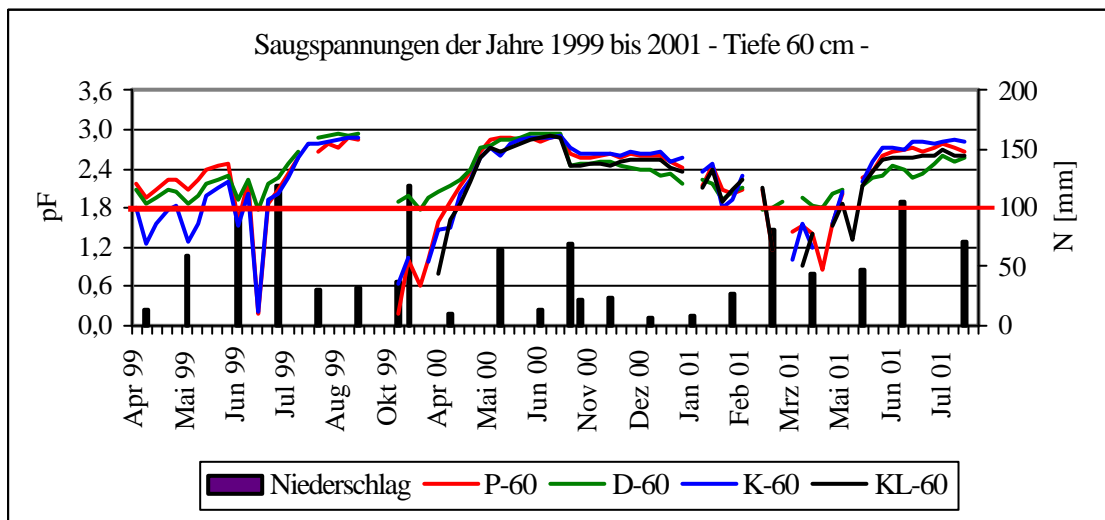


Abb. 46. Saugspannungen in der Tiefe 60 cm von 1999 bis 2001.

Aus der Abb. 46 ist erkennbar, dass der gesamte Kurvenverlauf der Tiefe 60 cm der Darstellung der 30 cm Ebene gleicht. Insgesamt waren die in 60 cm Tiefe ermittelten Saugspannungen geringer. Von April bis Juni 1999 lagen die Werte der Varianten P und D im Bereich von leicht pflanzenverfügbarem Wasser. Die gemessenen Werte der Variante K lagen in diesem Zeitraum unter FK. Im August und September 1999 stiegen die Saugspannungen aller Varianten auf Werte im Bereich von schwer pflanzenverfügbarem Wasser. Innerhalb dieser Kate-

gorie lagen die Gehalte der Variante P geringfügig unter denen der anderen Varianten. Durch die hohen Winterniederschläge wurde im März 2000 eine Aufsättigung des Bodens in der Tiefe 60 cm erreicht. Aber nur die Varianten P, K und KL wiesen bis in den April 2000 Werte unter der pF 1,8 auf. Die Saugspannungen der Variante D lagen in diesem Zeitraum im Bereich von pF 1,8 - 2,4.

Von April bis Juni 2000 stiegen die Saugspannungen in allen Varianten auf Werte über pF 2,4. Es waren nur geringe Unterschiede zu erkennen. Die Varianten K und KL wiesen geringere Saugspannungen auf. Durch die hohen Niederschläge im August und September 2000 verringerten sich die Saugspannungen in allen Varianten. Jedoch wurden Saugspannungen unter pF 1,8 erst im März 2001 erreicht (Abb. 46). Die Werte der Saugspannungen der Variante D lagen im Winter 2000/2001 sowie von Mai bis Juli 2001 unter den Werten der anderen Varianten. Jedoch fielen die Werte der Variante D weder im Winter 2000/ 2001 noch im Frühjahr 2001 unter pF 1,8. Die Werte der Varianten P, K und KL lagen von März bis Ende April 2001 im Bereich unter pF. Von Ende April bis Anfang Juni 2001 unterschritten die Werte aller Varianten die Grenze von pF 1,8. In den Monaten Juni und Juli 2001 wiesen die Varianten P und K die höchsten Saugspannungen auf. In der Variante D wurden in diesem Zeitraum die geringsten Saugspannungen ermittelt. Diese lagen Anfang Juni noch im Bereich von leicht pflanzenverfügbarem Wasser, während in den Varianten P, K und KL die Wasservorräte schon schwer pflanzenverfügbar waren.

Die Ebene 80 cm

In der Abb. 47 sind die ermittelten Wassergehalte der Ebene 80 cm dargestellt.

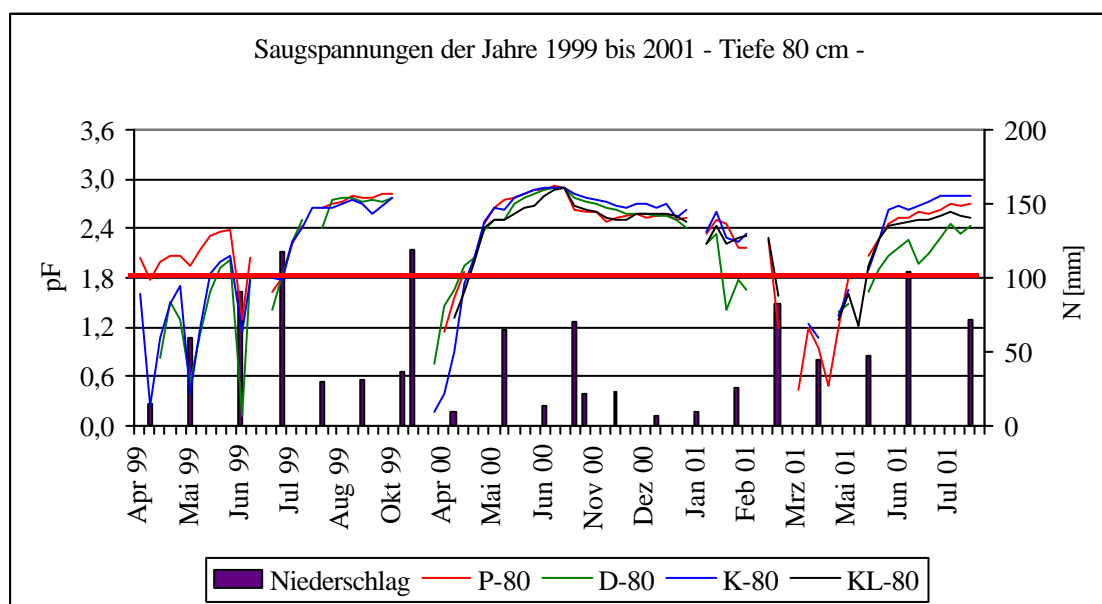


Abb. 47. Saugspannungen in der Tiefe 80 cm von 1999 bis 2001.

Die Kurvenverläufe in dieser Tiefe ähneln den Kurven der oberen Tiefen. Zu Beginn der Messungen bis in den Juni 1999 wiesen die nichtgepflügten Varianten deutlich geringere Wasserspannungen auf. Die Werte der Saugspannungen in den Varianten D und K lagen in diesem Zeitraum unter pF 1,8 und kennzeichnen damit ein Sickerwasserpotenzial (Abb. 47). Die ermittelten Wassergehalte zeigen für diesen Zeitraum jedoch keine Überschreitung der FK. Die Betrachtung beider Sachverhalte zusammen erfolgt durch die Sickerwasserberechnung. Die Variante P wies erst nach den hohen Niederschlagsmengen im Juni und Juli 1999 geringere Werte als pF 1,8 auf. Nach diesen hohen Niederschlägen wurden in den Varianten D und K die geringsten Saugspannungen ermittelt. Ende Juli 1999 überstiegen die Saugspannungen aller Varianten die Grenze von pF 1,8. Im August und September 1999 lagen die Saugspannungen ohne größere Unterschiede zwischen den Varianten im Bereich von pF 2,6.

Im März 2000 wurden in allen Varianten Saugspannungen unter pF 1,8 gemessen, was auf eine starke Aufsättigung des Bodens über die Winterperiode schließen lässt. Von Januar bis März 2000 wurden sehr hohe Niederschläge verzeichnet. Ende April wurde die Grenze von pF 1,8 in allen Varianten überschritten, wobei dies in den Varianten D und P geringfügig früher erfolgte. Bis in den Juni 2000 stiegen die Wasserspannungen auf pF 2,6, wobei die Variante KL teilweise geringere Werte aufwies. Im Herbst 2000 bis Januar 2001 lagen die Werte aller Varianten über pF 1,8 (Abb. 47). Die geringsten Werte wies im März und April die Variante P auf. Anfang Mai wurden in allen Varianten höhere Saugspannungen als pF 1,8 ermittelt. Von Mai bis Ende Juli 2001 wiesen die Varianten P, K und KL Saugspannungen im Bereich von schwer pflanzenverfügbarem Wasser auf. Innerhalb dieses Bereiches wies die Variante K die höchsten Saugspannungen auf. Die Werte der Variante D lagen in diesem Zeitraum im Bereich leicht pflanzenverfügbares Wasser. Auch überschritt die Variante D deutlich später als die anderen Varianten die Grenze von pF 1,8. Insgesamt ist eine deutliche Abnahme der Saugspannungen in den unteren Bodentiefen zu erkennen. Diese wiesen auch die höchsten Wassergehalte auf.

5.3.2.2 Sickerwassermengen

Sickerwasser

Die Sickerwassermengen wurden für die einzelnen Bodenbearbeitungsvarianten tageweise errechnet. In den Abb. 48 und Abb. 49 sind die ermittelten Monatssummen für die Ebenen 30 cm und 60 cm dargestellt.

Die Ebene 30 cm

Für die Sickerwasserberechnung wurden unterschiedliche, im Feld ermittelte, Grenzwassergehalte verwendet (Tab. 2).

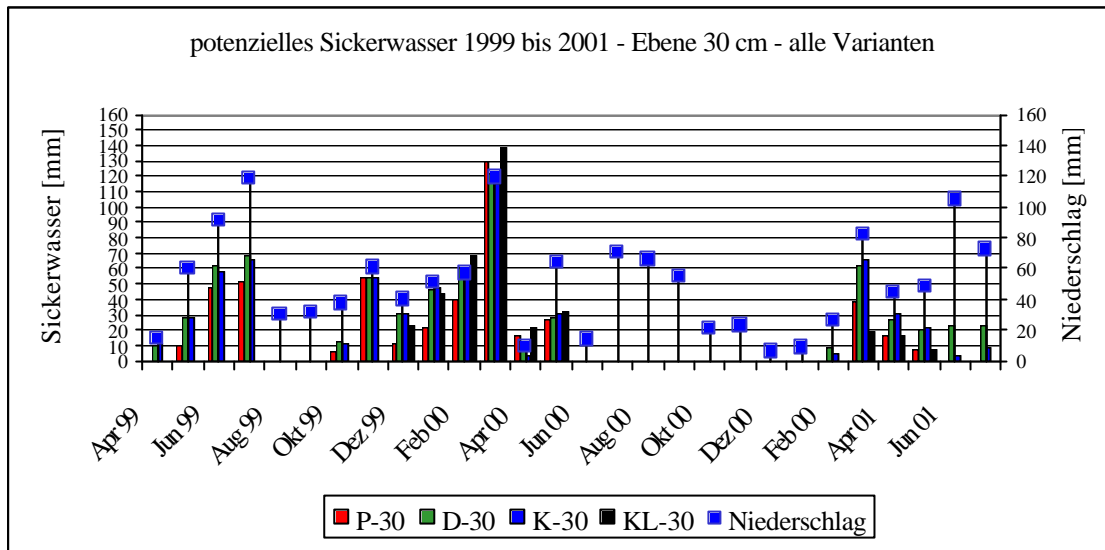


Abb. 48. Sickerwassermengen der Ebene 30 cm – Zeitraum 1999 bis 2001.

Die Variante P wies die geringsten Sickerwassermengen in 30 cm Tiefe von 1999 bis 2001 auf. Die errechneten Sickerwassermengen in der Variante P lagen in den 3 Jahren bei 477 mm, wogegen in der Variante K 650 mm und in der Variante D sogar 697 mm erreicht wurden. Eine hohe Versickerung ist in der Tiefe von 30 cm nicht negativ zu bewerten, da diese Wassermengen noch für die Pflanzen und vor allem leichter verfügbar sind.

Betrachtet man die 3 Jahre einzeln, so traten in der Variante P in den Jahren 1999 und 2000 die geringsten Sickerwassermengen auf. Nur im Jahr 2001 lagen die errechneten Mengen der Variante KL ca. 20 mm unter denen der Variante P. Die Variante K lag mit ihren Werten in allen 3 Jahren im Mittel. Die Variante D besaß im Jahr 1999 und 2001 die höchsten Werte dieser Ebene. Im Jahr 2000 lag die Variante KL mit 40 - 70 mm über den anderen Varianten. Addiert man die Summen der Jahre 2000 und 2001, so wird ersichtlich, dass die Variante KL sich ebenfalls im Mittel bewegte und die Variante P die geringsten sowie die Variante D die höchsten Sickerwassermengen aufwies.

In der Ebene 30 cm wiesen die Varianten D und K im Frühjahr 1999 und 2000, sowie im Herbst 2000 geringere Saugspannungen als die Variante P auf. In diesen Zeiträumen wiesen die nichtgepflügten Varianten höhere Wassergehalte auf.

Betrachtet man die für einen Sickerwasseranfall relevanten Zeiträume von September bzw. Oktober bis April, so wird erkennbar, dass von September 1999 bis April 2000 die Variante D die höchsten Werte aufweist (Abb. 48). Von Oktober 2000 bis April 2001 wurden in der Variante K die höchsten Sickerwassermengen ermittelt. In allen Varianten fielen ca. 70 % der Sickerwassermengen in den Zeitraum Januar bis April an (Abb. 48).

Die Ebene 60 cm

In der Abb. 49 sind die errechneten Sickerwassermengen der Ebene 60 cm für den gesamten Untersuchungszeitraum dargestellt.

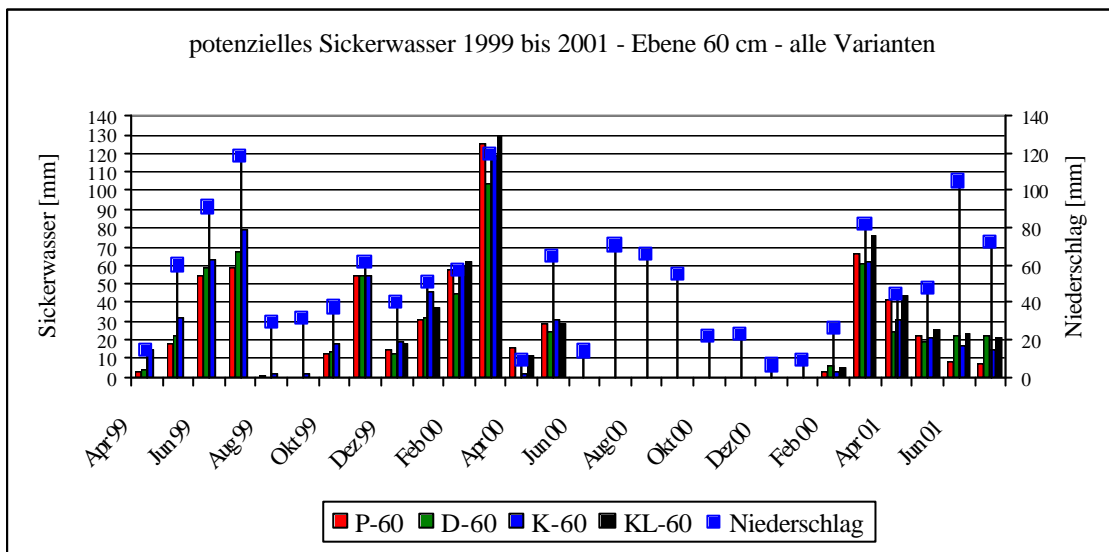


Abb. 49. Sickerwassermengen der Ebene 60 cm – Zeitraum 1999 bis 2001.

Im gesamten Untersuchungszeitraum von 1999 bis 2001 wurden für die Variante K mit 690 mm die höchsten Sickerwassermengen in der Ebene 60 cm ermittelt (Abb. 49). Die geringsten Werte wies die Variante D mit 595 mm innerhalb der 3 Jahre auf. Die Variante P lag mit 622 mm im Mittel. Im Jahr 1999 konnte die Variante KL aufgrund fehlender Messungen nicht berücksichtigt werden. Betrachtet man deshalb die Summe der Jahre 2000 und 2001, so wies die Variante KL die höchsten Sickerwassermengen auf. Für die Variante D konnten auch in dieser 2-jährigen Betrachtung die geringsten Sickerwassermengen ermittelt werden (Abb. 49).

Bei der Betrachtung der für den Sickerwasseranfall relevanten Zeiträume von September bzw. Oktober bis April wird ersichtlich, dass in der Variante D in diesen Zeiträumen der Jahre 1999/2000 und 2000/2001 die geringsten Sickerwassermengen anfielen. Dies ist hauptsächlich in dem hohen Grenzwassergehalt dieser Tiefe begründet (Tab. 2). Im Zeitraum von September 1999 bis April 2000 wies die Variante K mit 321 mm die höchste Sickerwassermenge

auf. Diese Menge liegt ca. 11 mm über der Menge der Variante P. Im Zeitraum Oktober 2000 bis April 2001 wies die Variante KL mit ca. 125 mm die höchsten Sickerwassermengen auf. Dieser Wert lag ca. 14 mm über dem Wert für die Variante P. Auch in dieser Tiefe fielen ca. 70 % des Sickerwassers im Zeitraum Januar bis April an.

Durch die Betrachtung eines 2- bzw. 3-jährigen Messzeitraumes ist gegeben, dass auch witterungsbedingt unterschiedlich geprägte Jahre berücksichtigt werden.

Hydraulischer Gradient

Da die Saugspannungen in der Variante KL im ersten Messzyklus 1999 aus arbeitstechnischen Gründen nicht ermittelt wurden, konnte für diesen Zeitraum keine Einschätzung zur möglichen Versickerung getroffen werden.

Durch fehlende Messungen von Saugspannungen konnten für einige Termine keine hydraulischen Gradienten berechnet werden. Deshalb wurde für die oberen Ebenen auf eine Berechnung der realistischen Sickerwassermengen verzichtet. Es wurden die realistischen Mengen an Sickerwasser für die Ebene 80 - 100 cm unter Einbezug des hydraulischen Gradienten berechnet. Die Tiefe 80 cm bildete die unterste Ebene für eine Wassergehaltserfassung. Die hydraulischen Gradienten wurden jeweils für den Zeitraum zwischen 2 Messungen zur Saugspannung ermittelt.

Die hydraulischen Gradienten der Ebene 80-100 cm

In der Abb. 50 sind die errechneten hydraulischen Gradienten der Ebene 80 - 100 cm dargestellt. Dabei kennzeichnen Werte größer Null eine Versickerung, Werte gleich Null eine Stagnation und Werte kleiner Null eine Wasserbewegung nach oben. Aus der Abb. 50 wird erkennbar, dass in einigen Zeiträumen eine Versickerung aufgrund der Potenzialunterschiede nicht möglich war, für welche aber ohne Berücksichtigung des hydraulischen Gradienten Sickerwassermengen errechnet wurden. Aufgrund dieses Sachverhaltes wurde für die Tiefe 80 cm eine erneute Sickerwasserberechnung durchgeführt. Dabei wurden nur die Mengen an Sickerwasser der einzelnen Wochen berücksichtigt, für welche ein hydraulischer Gradient größer als Null ermittelt werden konnte. Die hydraulischen Gradienten waren für die verschiedenen Bodenbearbeitungsvarianten in den einzelnen Untersuchungsjahren unterschiedlich ausgeprägt.

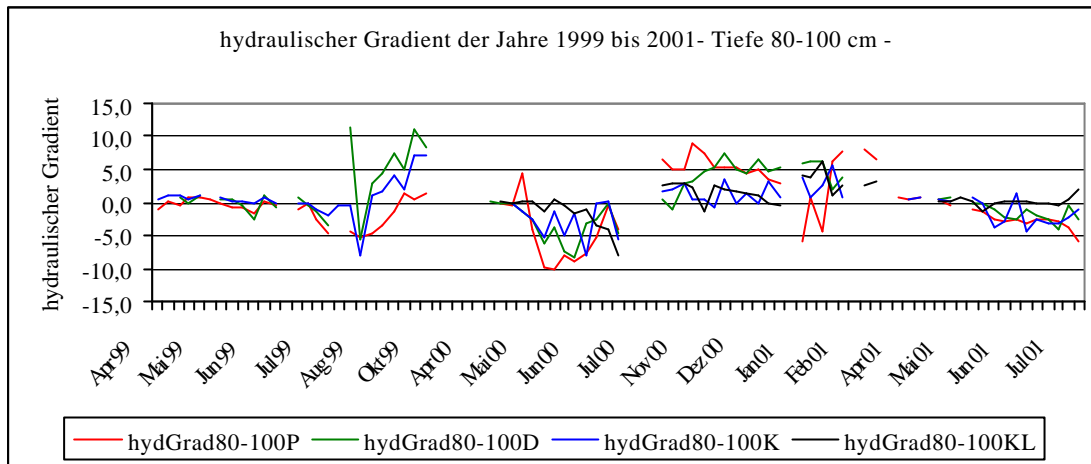


Abb. 50. hydraulische Gradienten der Ebene 80 – 100 cm – Zeitraum 1999 bis 2001.

Die realistischen Sickerwassermengen der Ebene 80 cm

In der Tab. 9 sind die mittels hydraulischen Gradienten errechneten Sickerwassermengen dargestellt. Diese Mengen sind in der Bezeichnung mit dem Kürzel r gekennzeichnet. Zum Vergleich zu den realistischeren Sickerwassermengen sind die Mengen aufgeführt, welche ohne die Berücksichtigung des Gradienten ermittelt wurden.

Tab. 9. Sickerwassermengen der Ebene 80 cm - kalibriert durch hydraulischen Gradienten; r entspricht den realistischen Berechnungen mittels hydraulischen Gradienten.

	P-80	P-80r	D-80	D-80r	K-80	K-80r	KL-80	KL-80r
Summe 3 Jahre	675,8	448,1	754,1	520,7	681,2	496,8		
Summe 1999	260,4	125,2	299,2	166,4	284,9	159,0		
Summe 2000	257,7	223,7	217,7	189,5	241,8	210,0	248,1	216,3
Summe 2001 (Messung nur bis 25.07)	157,8	99,2	237,3	164,8	154,5	127,7	203,9	156,1
Summe 2000 + 2001	415,5	322,9	454,9	354,3	396,3	337,8	452,0	372,4
Summe 01.09.99-30.04.00	322,5	319,6	284,2	284,2	307,9	307,9		
Summe 25.10.00-30.04.01	99,2	99,2	137,7	137,7	98,7	98,7	119,4	119,4
Summe 01.09.99-31.12.99	98,8	95,8	94,6	94,6	97,8	97,8		
Summe 25.10.00-31.12.00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Summe 01.01.00-30.04.00	223,7	223,7	189,5	189,5	210,0	210,0	216,3	216,3
Summe 01.01.01-30.04.01	99,2	99,2	137,7	137,7	98,7	98,7	119,4	119,4

Bei der Betrachtung und dem Vergleich der ermittelten Sickerwassermengen, z.B. für komplette Jahre, sind die Laufzeiten der jeweiligen Messungen zu beachten. So fielen im Jahr 2001 deutlich geringere Sickerwassermengen als in den Vorjahren an, was durch den kürzeren Messzeitraum begründet ist. Da in allen Varianten die gleichen Zeiträume betrachtet wurden, war die Vergleichbarkeit gewährleistet. Die Sickerwassermengen wurden für Zeiträume berechnet, für die Saugspannungen und Wassergehalte in engeren Zeiträumen vorlagen. Dies entspricht im Großteil den Messzeiträumen der TDR- und Tensiometermessungen. Die Berei-

che fehlender Messungen konnten interpoliert werden, wenn die Abstände nicht zu groß waren. In den 3 Untersuchungsjahren traten deutliche Unterschiede zwischen den Sickerwassermengen mit bzw. ohne Berücksichtigung des hydraulischen Gradienten auf (Tab. 9). Diese lagen im Bereich von durchschnittlich 200 mm in jeder Variante. In den wirklich sickerungsgefährdeten Zeiträumen von September 1999 bis April 2000 und Oktober 2000 bis April 2001 traten keine Unterschiede auf. Höhere Mengen an Sickerwasser im Vergleich zur Berechnung mittels hydraulischen Gradienten sind in den Gesamtjahren erkennbar. Dies beruht auf den Sickerwassermengen, welche ohne Berücksichtigung des hydraulischen Gradienten für die Frühsommer-, Sommer- und Spätsommermonate berechnet wurden. In diesen Monaten ist jedoch eine Versickerung aufgrund von starken Austrocknungen und der damit einhergehenden Zunahme der Saugspannungen eher gehemmt. Daraus folgt, dass die Berechnung mittels hydraulischen Gradienten realistischere Werte liefert.

Im Gesamtzeitraum der 3 Jahre wurden für die Variante D mit 521 mm die höchsten und für die Variante P mit 448 mm die geringsten Mengen ermittelt. Die Variante K lag mit 497 mm im Mittel. Die Variante P wies in den Jahren 1999 und 2001 die geringsten Sickerwassermengen aus der Ebene 80 cm auf. In diesen Jahren wurden in der Variante D die höchsten Mengen ermittelt (Tab. 9). Jedoch im Jahr 2000 wies die Variante D die geringsten und die Variante P die höchsten Sickerwassermengen auf. Da im Jahr 1999 keine Messungen für die Variante KL erfolgten, wurden die Summen der Jahre 2000 und 2001 im Vergleich der einzelnen Varianten dargestellt. In dem 2-jährigen Messzeitraum wies die Variante KL mit 372 mm die höchsten Mengen auf. Die Varianten D und K waren durch mittlere Sickerwassermengen gekennzeichnet. In der Variante P wurden mit 323 mm die geringsten Sickerwassermengen für den 2-jährigen Untersuchungszeitraum ermittelt.

Von entscheidender Bedeutung waren jedoch die ermittelten Sickerwassermengen über die Winterperiode, da in diesen Zeiträumen keine Nitrataufnahme durch die Kulturpflanzen erfolgt und gelöstes Nitrat ausgetragen werden kann. Im Messzeitraum von September 1999 bis April 2000 wies die Variante P mit 320 mm die höchsten Sickerwassermengen auf. Die Variante K lag ca. 12 mm unter diesem Wert. In der Variante D wurden mit 284 mm die geringsten Mengen von September 1999 bis April 2000 ermittelt (Tab. 9). Diese lagen ca. 36 mm unter denen der Variante P. Im Zeitraum von Oktober 2000 bis April 2001 wies die Variante D mit 138 mm die höchsten Sickerwassermengen auf. Die Varianten P und K lagen auf gleichem Niveau ca. 39 mm unter dem Wert der Variante D. Die Variante KL lag mit 119 mm im Mittel.

Die Varianten P und D lagen in der Summe der 2 Winterperioden mit jeweils 422 mm auf gleichem Niveau. In der Variante K wurden mit 407 mm die geringsten Sickerwassermengen ermittelt. Die Variante KL konnte hierbei durch fehlende Messwerte einer Winterperiode nicht berücksichtigt werden.

Die hydraulischen Gradienten der Ebene 100 - 130 cm – Aussage zur Tiefenversickerung

Die Ebene 80 cm stellt die maximale Tiefe dar, für welche Sickerwassermengen berechnet werden konnten. Diese Tiefe kennzeichnet aber noch nicht den endgültigen Austrag aus der durchwurzelten Zone. Gerade in trockenen Jahren wachsen die Wurzeln von Kulturpflanzen dem Wasser hinterher und können Wasser sowie gelöste Stoffe in Tiefen unter 80 cm aufnehmen. Eine endgültige Tiefenversickerung wurde durch den hydraulischen Gradienten der Ebene 100 – 130 cm beurteilt (Daten nicht dargestellt). In den Winterperioden 1999/2000 und 2000/2001 war eine Tiefenversickerung in allen Bodenbearbeitungsvarianten aufgrund des hydraulischen Gradienten der Ebene 100 – 130 cm realistisch.

In der Variante P konnten aus der Ebene 100 – 130 cm von April bis Juni 1999 Austräge größtenteils ausgeschlossen werden. Diese waren nur zu einzelnen Messterminen möglich. In der Variante K war von November 2000 bis Mitte Januar 2001 im Vergleich zu den anderen Varianten keine Abwärtsbewegung des Wassers nach dem hydraulischen Gradienten möglich. Ab Mitte Januar bis Ende April 2001 war auch in der Variante K eine Tiefenverlagerung des Wassers möglich. Da in der Zeit bis Mitte Januar wahrscheinlich kein nennenswerter Pflanzenentzug an gelöstem Nitrat erfolgte, kann davon ausgegangen werden, dass diese Stoffe dann verlagert werden, wenn eine Abwärtsbewegung des Wassers wieder möglich ist.

Nitratfracht

Die Konzentration in der Saugkerze gibt das Ende eines Stoffumsatzprozesses wieder. Es kann somit keine Verdünnung der in der Bodenlösung ermittelten Nitratkonzentration durch höhere Sickerwassermengen erfolgen. Die Berechnung ist in ähnlicher Form auch in DVWK (1985) erläutert.

Für die Berechnung der Nitratfracht wurden die Sickerwassermengen der Ebene 80 cm und die mittels Saugkerzen ermittelten Nitratkonzentrationen der Bodenlösung aus 90 cm Tiefe verwendet. Dabei wurde der Zeitraum für die einzelnen Berechnungen durch den Intervall der Probenahme mittels Saugkerzen vorgegeben. Dies war hauptsächlich ein wöchentlicher Rhythmus. Es wurde von der vereinfachten Annahme ausgegangen, dass für diesen wöchent-

lichen Zeitraum die zu Beginn dieses Zeitraumes ermittelte Konzentration unverändert in diesem Zeitintervall vorliegt. Die Nitratfracht wurde in nach ROHMANN & SONTHEIMER (zit. n. WANTULLA 1987) ermittelt.

$$N_A = b * C_{(NO_3)} * A_S$$

N_A	<i>ausgewaschener Nitratstickstoff in kg N/ha</i>
b	<i>Faktor 1/443 für die Umrechnung der Konzentrationsangabe mg NO₃/l in die Dimension kg NO₃-N/ha</i>
$C_{(NO_3)}$	<i>über einen Untersuchungszeitraum gemittelte Nitratkonzentration des Sickerwassers in mg NO₃-/l</i>
A_S	<i>Sickerwassermenge in mm/Zeit</i>

Die Frachtangabe in kg N/ha setzt die vereinfachte Annahme voraus, dass auf einem gesamten Hektar in der Ebene die ermittelte Konzentration herrscht. Es wird durch die Frachten angegeben, welche Menge an Stickstoff einen Hektar Fläche aus der Ebene 90 cm verlässt.

Die Perioden der Probenahme mittels Saugkerzen waren in den Jahren 2000 und 2001 unterschiedlich lang. Im Jahr 2000 fanden Beprobungen vom 06.03. bis zum 11.05. an 8 Terminen statt. Im Jahr 2001 wurden zu 14 Terminen zwischen dem 14.02. bis zum 06.06. Probenahmen durchgeführt (Abb. 24). Da zu einzelnen Terminen nicht für alle Varianten Ergebnisse vorlagen, wurden verkürzte Zeiträume betrachtet. Somit war ein direkter Vergleich der Varianten möglich. Im Frühjahr 2000 wurden in der Variante P mit 3,1 kg N/ha die höchsten Austräge ermittelt. Die Variante D wies mit 1,5 kg N/ha die geringsten Austräge in diesem Zeitraum aus. Die Varianten K und KL lagen 1,7 kg N/ha und 1,8 kg N/ha unter den Werten des Austrages in der Variante P.

Im Jahr 2001 wies die Variante D mit einem Austrag von 4,3 kg N/ha deutlich den höchsten Wert auf. Die geringsten Austräge wurden in den Varianten K und KL mit Werten von 0,2 kg N/ha bzw. 0,1 kg N/ha errechnet. Die Variante P lag mit einem Austrag von 0,5 kg N/ha nur gering über den Varianten K und KL. Insgesamt wurden für beide Perioden für die Variante D mit 5,8 kg N/ha die höchsten Austräge errechnet. Die Varianten K und KL wiesen mit insgesamt 1,9 kg N/ha die geringsten Austräge auf. Die Variante P lag 1,7 kg N/ha über den Varianten K und KL.

5.4 Reliefeigenschaften

Durch das mittels Punktaufnahme im Gelände gefertigte DGM sind präzisere Aussagen möglich. Das Geländemodell, für welches die Punktaufnahme selbstständig im Feld erfolgte, wird als DGM 2 bezeichnet. Mit DGM 1 ist das Geländemodell gekennzeichnet, welches anhand der TK 10 angefertigt wurde. Sämtliche Auswertungen der flächenhaften Beprobung wurden in Verbindung mit dem Geländemodell 2 durchgeführt. In die Auswertung der Parameter des C/N-Verhältnisses ist die Präzision des eigenen Modells eingeflossen. Teilweise wurden Unterschiede innerhalb der Bodenbearbeitungsvarianten erst durch die Lage im Raum erklärbar.

Auch die Bildung von reliefangepassten Gruppen und zweckmäßige Bewertung der untersuchten Parameter wurde erst durch die Raumanalyse möglich. Unter dem Punkt Reliefeigenschaften werden jedoch einzelne Aspekte der Oberflächenbeschaffenheit ausgewertet. Durch deren Betrachtung ist eine Bewertung der Gesamtaussagen hinsichtlich möglicher Verzerrungen und Zweckmäßigkeit der Untersuchung möglich. Es können eventuelle Grenzen aufgezeigt werden, bis zu welchen die ermittelten Aussagen gültig sind.

Bei der Beschreibung des Reliefs wird zwischen Makrorelief und Mikrorelief unterschieden werden. Als Makrorelief sind die verschiedenen Einheiten zu bezeichnen, welche unter Punkt 2.3 erläutert wurden. Die hier aufgeführten Auswertungen beziehen sich auf das Mikrorelief.

Verteilung der Höhengschichten

In der Abb. 51 ist das DGM 2 mit den ermittelten Höhengschichten dargestellt. Die Einordnung des Modells in den Raum ist durch die Hoch- und Rechtswerte möglich. Die Bodenbearbeitungsvarianten sind durch die Grenzlinien erkennbar. Dabei sind die Varianten in der Abfolge P, D, K und KL sowie die östliche Restfläche von West nach Ost ersichtlich.

Der Medianwert der aufgenommenen Höhen liegt bei 263 m. Das Maximum liegt bei 279 m und das Minimum bei 245 m. Die stationären Messpunkte zur Ermittlung des Wassergehaltes, der Saugspannung, zur Entnahme der Bodenproben und Bodenlösungen sind im Geländemodell durch Kästchen gekennzeichnet (Abb. 51). Es wird dabei erkennbar, dass sich die Messplätze auf unterschiedlichen Höhenstufen befanden. Die Messplätze der Varianten P und D lagen in einem Höhenbereich von 260 - 265 m, während die Messplätze der Varianten K und KL in einem Höhenbereich von 255 - 260 m angelegt waren. Alle Messplätze befanden sich im Oberhangbereich.

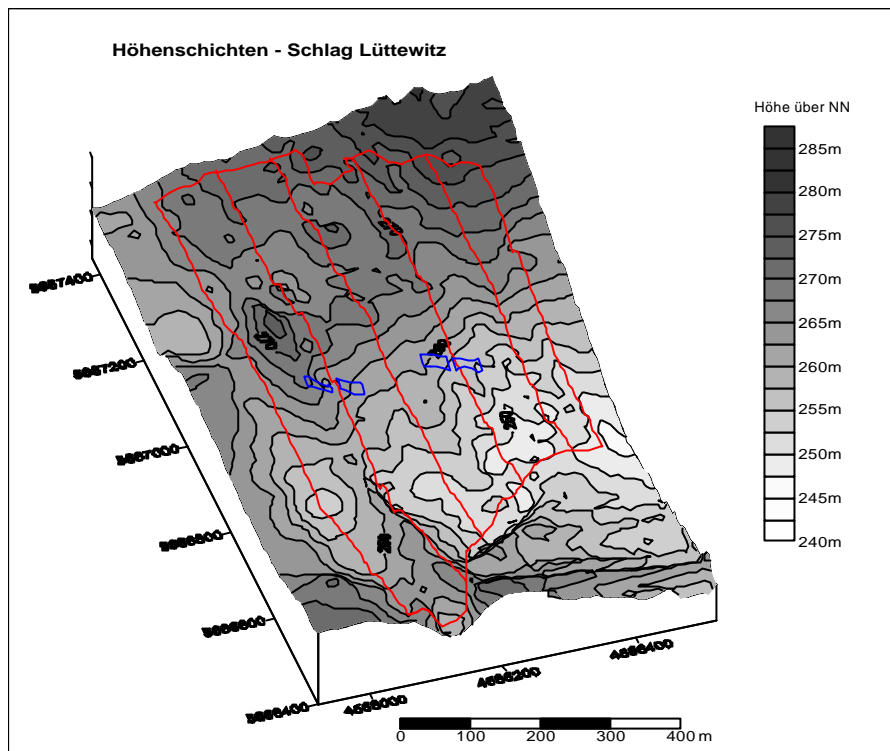


Abb. 51. Höhenschichten Schlag Lüttewitz (Bearbeitungsgrenzen der Varianten P, D, K, KL von West nach Ost).

Durch die Feingliedrigkeit der Höhenstufen kann das heterogene Mikrorelief innerhalb des Schlages erkannt werden. Im oberen Bereich des Schlages befindet sich eine Senke, welche hauptsächlich in den Varianten P und D ausgeprägt ist. In diesem Bereich befanden sich die Beprobungspunkte P1, P2, D2 und D3. Der Haupthang fällt nach Südosten ab. Im südlichen Senkenbereich ist in der Variante P an den Punkten P6 und P7 eine Senke ausgebildet. Eine größere Senkenstruktur setzt sich weiter nach Osten fort. In ihr bildet sich ca. 50 m vom Schlag entfernt ein Vorfluter. Das Makrorelief ist durch zahlreiche für die Region typische Dellenstrukturen durchzogen. Diese Strukturen beeinflussen das Abflussgeschehen. Im Bereich des Punktes K2 konnte deutlich eine Zwischensenke erkannt werden.

Hangneigung

Nach KA 4 (1994) beeinflussen die Neigung und Wölbung der Geländeoberfläche maßgeblich das Abflussgeschehen sowie den damit verbundenen Stofftransport.

Die stationären Messplätze befanden sich in Bereichen mit 5-7° Hangneigung (Abb. 52). Diese Neigungen entsprechen nach KA 4 (1994) der Stufe N 3.1 mittel geneigt. Die höchsten Hangneigungen wurden an den Punkten P3 und P4 ermittelt. Diese lagen bei 11° und fallen somit in die Klasse N 4 stark geneigt. Die durchschnittlichen Hangneigungen des Schlages lagen bei 3 - 5 ° und können durch die Klasse N 2.2 schwach geneigt beschrieben werden.

Durch die Heterogenität der Hangneigung auf dem Untersuchungsschlag kann die feingliedrige Oberfläche nachvollzogen werden. In den Varianten D und K fanden sich die größten Anteile mit Hangneigungen unter 2°. Größere Variationen in der Hangneigung waren in den Varianten P und KL zu erkennen (Abb. 52).

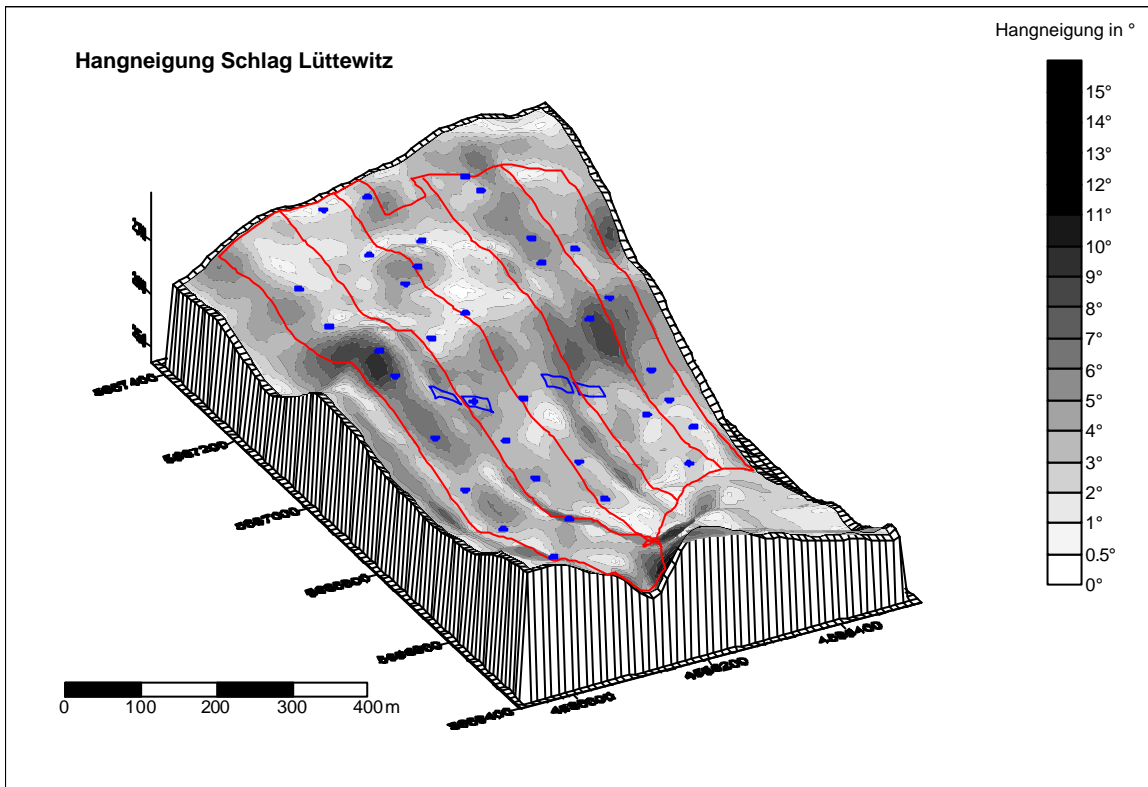


Abb. 52. Hangneigung Schlag Lüttewitz (Darstellung der Bearbeitungsgrenzen, der stationären Messplätze sowie der Beprobungspunkte der flächenhaften Beprobung).

Potentielle Fließbahnen von oberflächennahen Stoffströmen

In der Abb. 53 sind die ermittelten potenziellen Fließbahnen für mögliche oberflächennahe Wasserbewegungen dargestellt. Durch diese Untersuchung sollte ermittelt werden, ob sich die Messplätze an vergleichbaren Stellen befanden oder ob Positionen vorhanden waren, an denen ein erhöhter Wasserzufluss möglich sein konnte.

Aus der Abb. 53 kann erkannt werden, welche potentielle Fließbahnen für Wasserbewegungen und oberflächennahe Stoffströme sich ausbilden können. Die Größe der abgebildeten Pfeile kennzeichnet jeweils die Höhe des Zuflusses. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass bei dieser Form der Oberflächenanalyse die Grenzen, welche aufgrund von Bearbeitungsunterschieden zwischen den Varianten entstehen nicht berücksichtigt wurden.

Es konnte erkannt werden, dass alle 4 stationären Messplätze durch ihre Lage im Oberhang Zuschüsse an Wasser von Norden und den Flanken erhalten konnten (Abb. 53). Es konnte

keine Ungunstpotion für einen Messplatz ausgemacht werden, welche zu einem erhöhten Anfall von Oberflächenwasser geführt hätte. In der nördlichen Senke wurden die deutlich nach Westen ausgerichteten Fließbahnen erkennbar. Dies begründet den erhöhten Humusgehalt der Tiefe 0 - 30 cm und die größere Horizontmächtigkeit der untersuchten oberen Hbrizonten in diesem Bereich. Aus der Abb. 53 wird ersichtlich, aus welchem größeren Bereich sich hier Stoffströme bündeln. Die möglichen Ausmaße sind in der Abb. 31 ersichtlich.

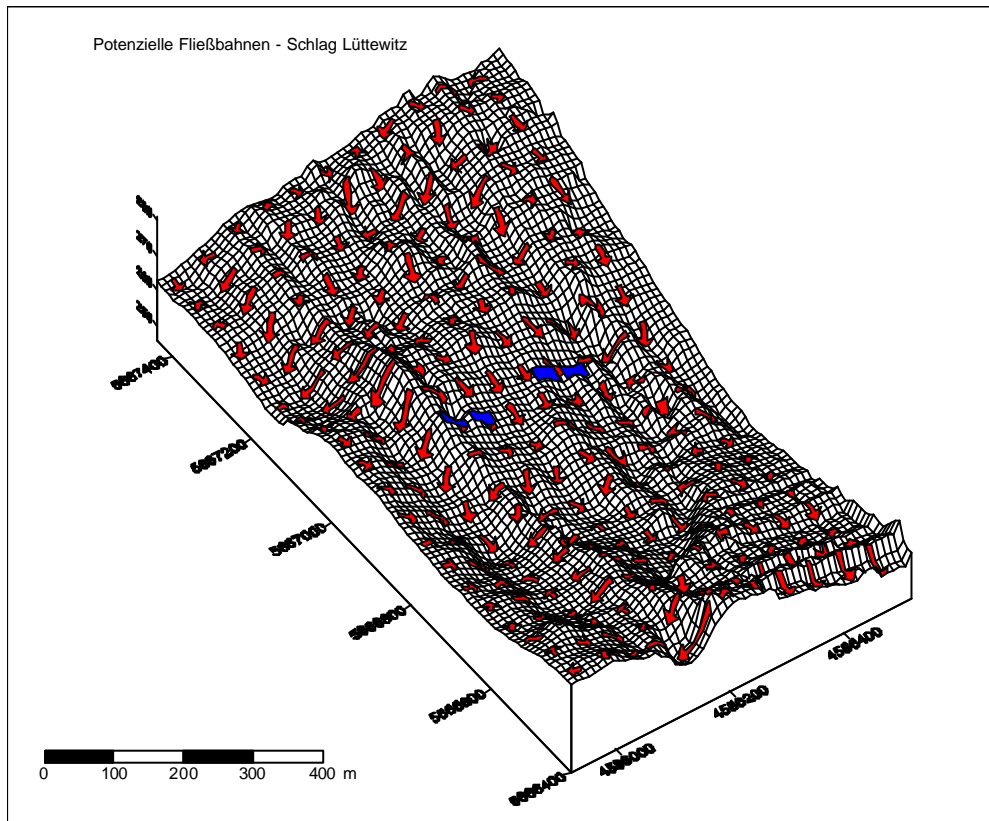


Abb. 53. potenzielle Fließbahnen Schlag Lüttewitz (Größe der Pfeile kennzeichnet Stärke des Stoffstromes).

Wölbungstendenz

Nach KA 4 (1994) setzt sich das Oberflächenrelief aus mehr oder weniger stark gewölbten Abschnitten zusammen. Die Wölbung einer beliebigen einheitlich gewölbten Fläche wird durch die Wölbungsrichtung, Wölbungstendenz und Wölbungsstärke beschrieben.

In der Abb. A 14 sind die ermittelten Wölbungstendenzen dargestellt. In der Variante P befanden sich die Punkte P1, P3, P4 in deutlich konvexen Bereichen. Die Punkte P6 und P7 lagen in konkaven Abschnitten. In den konvexen Bereichen der Punkte P3 und P4 fanden sich verringerte Humusgehalte der Schicht 0 - 30 cm (Abb. 30). Der Punkt P2 ist in der Abb. A 14 als leicht konkaver Bereich ausgewiesen. Erst durch die Darstellung der Divergenz- und Konvergenzbereiche (Abb. 54) ist die Senkenlage und die damit verbundene Materialzufuhr erkennbar. In der Variante D wurde am Punkt D3 eine Zunahme des Humusgehaltes in der Tie-

fe 0 - 5 cm ermittelt (Abb. 28). Dies konnte durch eine Höhengschichtenkarte nicht interpretiert werden. In der Abb. A 14 wird erkennbar, dass der Punkt D3 in einem deutlich konkaven Bereich lag. Innerhalb der Variante K befand sich der Punkt K1 in einem konvexen Bereich. An diesem Punkt wurde auch eine geringe Mächtigkeit der reliefbeeinflussten Horizonte ermittelt (Abb. 55). Am Punkt K2 ist ein deutlich konkaver Bereich erkennbar, wodurch auch die Zunahme des Humusgehaltes der Ebene 0 - 30 cm erklärbar war. Der Punkt K5 befand sich in einem gestreckten Bereich. Hieraus resultierte die geringe Mächtigkeit der untersuchten Horizonte. In der Variante KL befanden sich die Punkte KL1, KL2 und KL4 in deutlich konkaven Bereichen, wodurch hier die hohen Humusgehalte der Tiefe 0 - 30 cm erklärbar wurden. Der Punkt KL5 lag in einem konvexen Bereich. An diesem Punkt wurden verringerte Humusgehalte der Tiefe 0 - 30 cm und eine geringe Mächtigkeit der untersuchten Horizonte ermittelt (Abb. 55).

In der südlichen Senke wurde in allen Varianten in den konkaven Bereichen eine Erhöhung der Humusgehalte in der Schicht 0 - 30 cm ermittelt. Bei der Betrachtung der Lage der stationären Messplätze wurde deutlich, dass sich die Stationen der Varianten P, D und K in leicht konvexen Bereichen befanden. Für die Lage der Messstation der Variante KL konnte ein konkaver Bereich ausgemacht werden (Abb. A 14).

Divergenz- und Konvergenzbereiche

In der Abb. 54 Divergenz- und Konvergenzbereiche ausgewiesen.

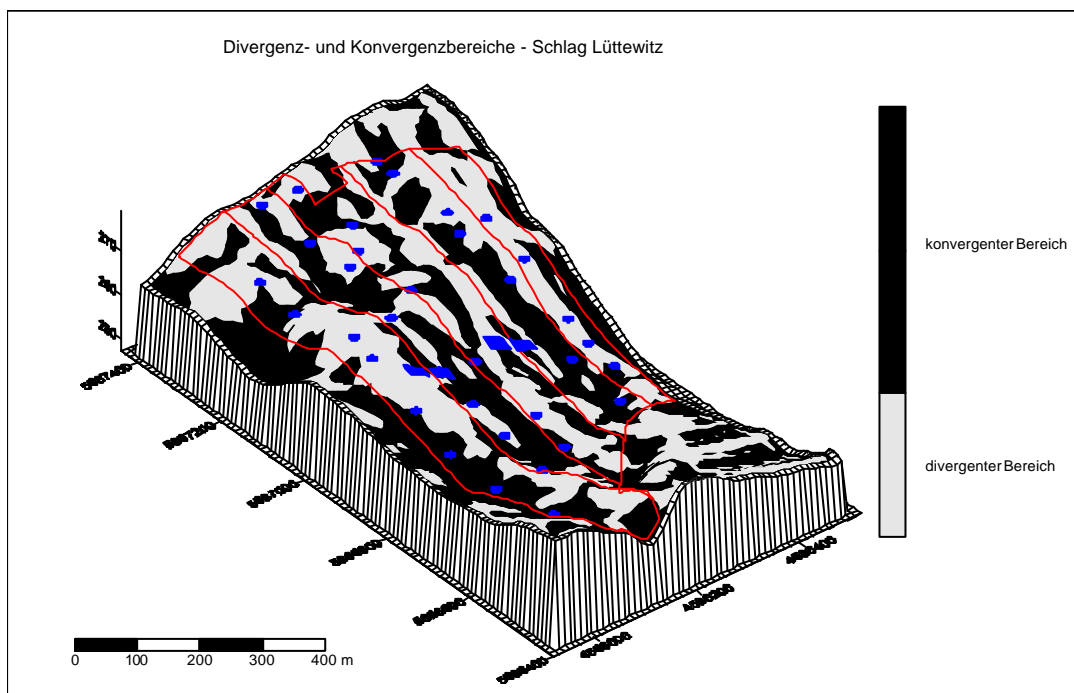


Abb. 54. Divergenz- und Konvergenzbereiche Schlag Lüttewitz (Darstellung der Bearbeitungsgrenzen, der stationären Messplätze sowie der Beprobungspunkte der flächenhaften Beprobung).

In dieser Darstellung sind entsprechende Bereiche zu Verhaltenseinheiten in Bezug auf Zufuhr von Wasser und Bodenmaterial zusammengefasst.

Es wird erkennbar, dass sich alle Messstationen in der 4 Bodenbearbeitungsvarianten in einem konvergenten Bereich befanden (Abb. 54). Somit waren Unterschiede in Bezug auf Zuschuss an Wasser oder Bodenmaterial durch die Lage im Gelände ausgeschlossen. Weiterhin wird deutlich, von welchen Strukturen die Oberfläche durchzogen wird. Bereiche, welche anhand der Darstellung der Höhenschichten als Senke ausgemacht wurden (Abb. 51), sind hier deutlich gegliedert dargestellt. Innerhalb dieser größeren Senkenbereiche ist eine Ausbildung von Zwischensenken erkennbar. Der Punkt P2 befand sich deutlich in einem konvergenten Bereich. An diesem Punkt konnte eine Zunahme des Humusgehaltes in der Schicht 0 - 30 cm ermittelt werden. Eine Verringerung des Humusgehaltes der Tiefe 0 - 30 cm konnte an den Punkten P3 und P4 verzeichnet werden, was durch die Lage in einem divergenten Bereich und einer hohen Hangneigung begründet ist.

Die Exposition kennzeichnet die Neigung eines Hanges zur Himmelsrichtung (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 1998). Nach den Autoren ist die Unterscheidung zwischen Sonnenhängen, mit einer Exposition Südost bis West, und Schattenhängen, mit einer Exposition zwischen Nordwest bis Ost bedeutend. In Abhängigkeit von Inklination und Exposition stellt sich ein örtliches Kleinklima ein, dass teilweise stärkere Auswirkungen auf die Bodenentwicklung haben kann als das vorherrschende Großklima. So sind meistens sowohl die Luft- und Bodentemperaturen, als auch die Werte der Lichtintensität und Verdunstung an den Schattenhängen niedriger als an den Sonnhängen. Der Wechsel zwischen Gefrieren und Auftauen der Böden an Schattenhängen ist weniger häufig als an Sonnhängen.

Nach Analyse der Exposition wurde deutlich, dass eine Humusakkumulation an den Punkten P2 und K2 begünstigt wird. Diese Punkte lagen innerhalb der Untersuchungsfläche in einem Schattenbereich. Durch die verringerte Sonneneinstrahlung und die damit verbundenen geringeren Temperaturen sind hier verlangsamte Mineralisationsprozesse möglich. An diesen Punkten wurde eine Erhöhung des Humusgehaltes in der Tiefe 0 - 30 cm gemessen. Bei der Betrachtung der Lage der stationären Messplätze wurde erkennbar, dass sich die Stationen der Varianten P und D auf der Schattenseite befanden. Hierdurch können verringerte Temperaturen bedingt sein. Dies wurde während der Messung der Bodentemperaturen 1999 bestätigt. Den Großteil des Schlages besteht aus einem nach Süden exponierter Haupthang, welcher

kleinere Schattenbereiche aufweist. Diese spielen bei der vergleichende Betrachtung der Bodenbearbeitungsvarianten eine untergeordnete Rolle (Daten nicht dargestellt).

Horizontmächtigkeit der reliefbeeinflussten Horizonte

Junge Sedimente wechselnder Körnung entstehen auch durch Erosion als Kolluvien an Hangfüßen, nachdem die Böden der Hänge in Ackerkultur genommen wurden (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 1998). Nach KA 4 (1994) wird das durch Wasser abgetragene Bodenmaterial in Bereichen mit geringer Reliefenergie wieder abgelagert und kann hier zu Überdeckungen führen.

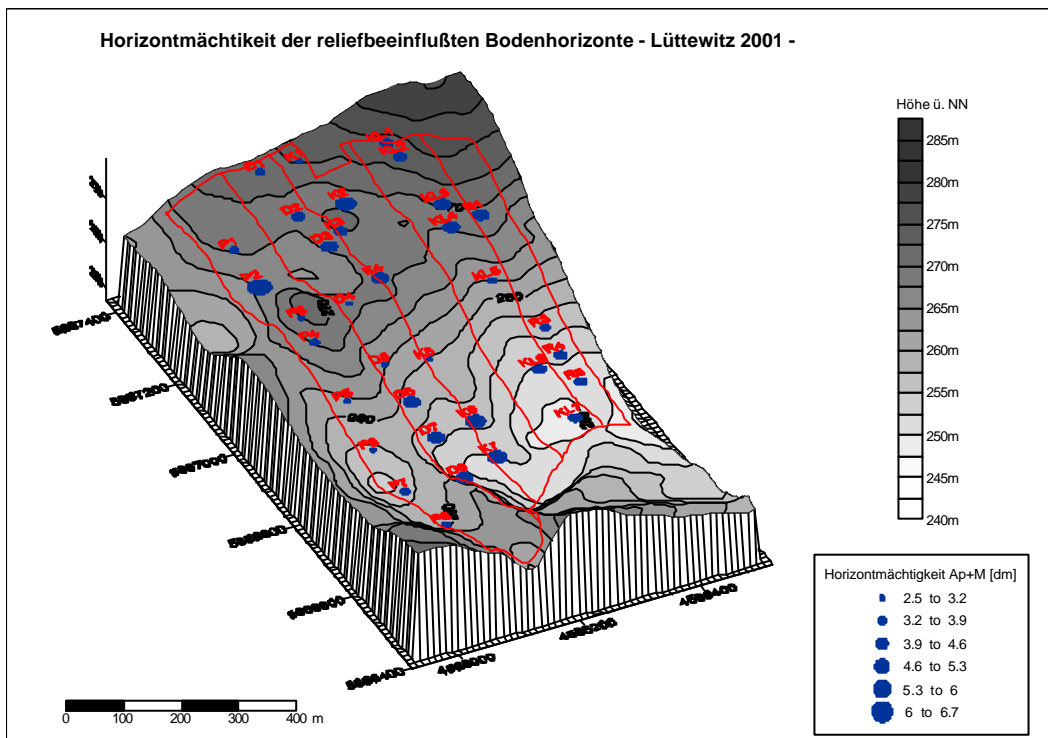


Abb. 55. Mächtigkeit der reliefbeeinflussten Bodenhorizonte (Darstellung der Bearbeitungsgrenzen, der stationären Messplätze sowie der Beprobungspunkte der flächenhaften Beprobung).

Während der flächenhaften Beprobung wurden gleichzeitig die Mächtigkeit des Ap-Horizontes und eines eventuell vorhandenen M-Horizontes aufgenommen. Für den Schlag liegt eine entsprechende Bodenkarte nach TEIWES (1997) vor. Die Gesamtheit der Horizonte, der Ap-Horizont und wenn vorhanden der M-Horizont, konnte gut zu den unterlagernden Al-Horizonten oder imC-Horizonten abgegrenzt werden.

Nach KA 4 (1994) wird als Ap-Horizont der mineralische Oberbodenhorizont bezeichnet, welcher durch regelmäßige Bodenbearbeitung geprägt ist. Unter M-Horizont wird ein Mineralbodenhorizont verstanden, welcher durch fortlaufend sedimentiertes Solummaterial entstanden ist. Als Solummaterial wird eine vor der Umlagerung pedogen veränderte, fluviale,

durch Abspülung an Hängen oder durch Bodenbearbeitung sowie äolisch transportierte Auftragsmasse bezeichnet. In der Regel besitzt ein M-Horizont über 1 Gew.-% organische Substanz.

Innerhalb einer ebenen Fläche kann, ähnliche geogene Verhältnisse vorausgesetzt, von vergleichbaren Bedingungen für die Bodenbildung ausgegangen werden. Veränderungen der oberen Bodenhorizonte können auf den Oberflächen- und Bearbeitungseinfluss zurückgeführt werden. Durch die Bodenbearbeitung erfolgt eine Gefügelockerung. Diese ist je nach Spezifik der entsprechenden Bodenbearbeitungsvariante unterschiedlich stark und bis in unterschiedliche Tiefen ausgeprägt. Die Gefügelockerung, der Gehalt an organischer Substanz, eine Bodenbedeckung mit Pflanzenbestand oder Mulchmaterial beeinflussen die Anfälligkeit für Wasser- und Winderosion. In der Abb. 55 sind die erfassten Veränderungen der oberen beiden Horizonte dargestellt. Die beiden Horizonte wurden als reliefbeeinflusster Gesamthorizont betrachtet.

In der Variante P war eine annähernd gleichmäßige Horizontierung des Gesamthorizontes zu erkennen. Die Untergrenze des Gesamthorizontes lag hier bei durchschnittlich 3,3 dm und ist durch den Pflugeinfluss erklärbar. Leichte Erhöhungen waren in dem Bereich der nach der Bodenkarte ausgewiesenen Kolluvisole erkennbar (Abb. 6). Am Punkt P7 lag die Untergrenze des Gesamthorizontes im Bereich von 3,2 bis 3,9 dm. Im Kuppenbereich am Punkt P3 sowie im Mittelhangbereich am Punkt P5 lagen die geringsten Mächtigkeiten dieses Gesamthorizontes vor. Dies ist durch Erosion begründet. Ein Materialeintrag war am Punkt P2 zu erkennen. Dieser Beprobungspunkt lag außerhalb des nach TEIWES (1997) ausgewiesenen Bereiches für den Bodentyp Kolluvisol. Am Punkt P2 lag die ermittelte Horizontmächtigkeit des Gesamthorizontes bei 6 dm (Abb. 55). Aus dem Geländemodell wird die Lage des Punktes innerhalb einer Senke erkennbar (Abb. 54).

In der Variante D waren größere Mächtigkeiten des betrachteten Gesamthorizontes zu erkennen. Diese lagen im Durchschnitt bei 4,4 dm. Deutliche Verkürzungen auf ca. 2,5 dm waren auch hier im Kuppenbereich und Oberhangbereich an den Punkten D4 und D5 zu erkennen. Da die Bodenbearbeitung mit Direktsaat deutlich den Oberflächenabfluss verringert und eine Bodenbewegung während der Bearbeitung nur minimal in den obersten 5 cm erfolgt, müssen diese Verringerungen hauptsächlich auf den Zustand vor Umstellung der Bearbeitung zurückgeführt werden. Weiterhin ist die verringerte Tiefe des Gesamthorizontes am Punkt D4 und D5 auf die nicht sehr tiefe Durchmischung des Bodens zurückzuführen. Die Varianten K und

KL wiesen im Höhengschichtenbereich des Punktes D4 deutlich höhere Horizontmächtigkeiten auf. Diese lagen an den Punkten K4 und KL4 bei ca. 5 dm. Eine Zunahme der Mächtigkeit des Gesamthorizontes war an den Punkten D2 und D3 sowie D6 bis D8 zu erkennen. In diesen Bereichen waren nach der Bodenkarte von TEIWES (1997) Kolluvien als Bodentyp ausgewiesen.

Eine Verringerung der Horizontmächtigkeit wurde an den Punkten K1 und K5 ermittelt. Diese Punkte befanden sich in Abtragungsbereichen, mit deutlich konvexer bzw. gestreckter Wölbungstendenz (Abb. A 14). In der Variante KL lagen die ermittelten Mächtigkeiten des Gesamthorizontes im Bereich von 2,9 – 4,6 dm. An den Punkten KL3 und KL4 wurden Mächtigkeiten über 4,6 dm ermittelt. Der Punkt KL4 befand sich in einem deutlich konkaven Bereich. In dem Bereich der Punkte KL6 und KL7 wird die Anlagerungstendenz von Bodenmaterial durch eine neue Bodenbildungstendenz überlagert. In diesem Bereich konnten deutlich Stau- und Grundwassereinflüsse während der Probenahme ausgemacht werden. Auf der beprobten Restfläche wurden durchschnittliche Horizontmächtigkeiten des Gesamthorizontes von 3,9 – 4,6 dm ermittelt.

In allen Varianten waren Verkürzungen der betrachteten Horizonte im Mittelhangbereich zu erkennen (Abb. 55). Insgesamt sind in den nichtgepflügten Varianten und auf der beprobten Restfläche größere Mächtigkeiten des Gesamthorizontes ausgebildet.

6 Diskussion

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Erfassung und Bewertung von Unterschieden im Stickstoffhaushalt und dem sickerwassergebundenen Nitrataustrag bei konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung. Weiterhin sollten die räumlichen Unterschiede in der Verteilung der Humusgehalte zwischen den Bearbeitungsvarianten beurteilt werden. Außerdem wurde der Einfluss der Oberflächeneigenschaften auf die untersuchten Parameter analysiert.

6.1 Diskussion der Methoden

6.1.1 Bodenphysikalische und bodenchemische Untersuchungsmethoden

Nach TEEBKEN et al. (1994) verwenden zahlreiche Wissenschaftler berechtigt die Veränderungen der N_{min} -Werte über die Winterperiode zur Abschätzung der N-Verlagerung. Dabei muss aber bewusst sein, dass punktuell durchgeführte N_{min} -Untersuchungen zwischenzeitlich erfolgte Umsetzungsvorgänge nur unzureichend erfassen. Bei den von TEEBKEN et al. (1994) durchgeführten Untersuchungen wurden N_{min} -Probenahmen nach Ernte der Vorfrucht und vor dem Vegetationsbeginn durchgeführt. Durch große zeitliche Abstände zwischen den Probenahmen wird nach Angaben der Autoren der N-Austrag unterschätzt.

In der vorliegenden Arbeit sind Probenahmen in kürzeren Abständen durchgeführt wurden.

Für die Erfassung der Bodenlösung wurden auf dem Untersuchungsschlag Saugkerzen verwendet. Nach SCHLICHTING, BLUME, STAHR (1995) wird mittels Saugkerzen Bodenlösung gewonnen, welche den Mittel- und Grobporen entstammt. Das Bodenwasser in den Feinporen kann eine andere Konzentration aufweisen, wodurch eine Umrechnung auf die gesamte Bodenlösung fehlerhaft wäre. Da sich Pflanzenwurzeln in den Bereichen der Mittel- und Grobporen aufhalten, wird das ökologisch wirksame Wasser untersucht.

Bei der Verwendung von Saugkerzen besteht die Möglichkeit, dass sich um die Saugkerze ein hydraulisches Potenzialfeld aufbaut, welches die Probenahme beeinflussen kann. In längeren Saugphasen kann Bodenlösung aus anderen Horizonten angesaugt werden. Infolge des permanenten Druckgefälles können Fließwege entstehen, welche die hydrologischen Bedingungen im Umfeld von Saugkerzen beeinflussen (DVWK, 1990). Die Abgrenzung des Einzugsgebietes von Saugkerzen gestaltet sich als schwierig. Nach DVWK (1985) können im Jahr des

Einbaus teilweise höhere Werte aufgrund der durch die Bodenlockerung angeregten N-Mobilisierung gemessen werden.

Die auf dem Schlag Lüttewitz verwendeten Saugkerzen besaßen P-80 Keramikköpfe. Nach GROSSMANN et al. (1987) treten keine Freisetzungen von Stoffen aus den P-80 Keramikköpfen im Hinblick auf die Stickstoffuntersuchung auf. Die Bodenlösung kann nach HONISCH (1996) bei der Passage durch den Boden hin zur Kerze, als auch bei der Passage durch die Kerze hindurch und bei längerer Lagerung in der Kerze stofflichen Veränderungen unterliegen. Dadurch sind Unterschiede zwischen dem tatsächlichen Sickerwasser und dem Saugwasser möglich.

Eine größere räumliche Variabilität ist bei der Nitratverlagerung gegeben. Nach Auswertung verschiedener Literaturquellen kommt HONISCH (1996) zu dem Schluss, dass auch mit einer Erhöhung der Kerzenzahl keine deutliche Verringerung der Variationen zu erreichen ist. Als Ursachen werden unregelmäßig verteilte Makroporen und präferentielle Fließwege aufgeführt. Diese Ergebnisse bestätigen auch die Untersuchungen von RIEß (1993). Inwieweit der Wasser- und Stofftransport in Makroporen von Saugkerzen erfasst wird, hängt nach GROSSMANN (1988) davon ab, ob diese mit einer Kerze direkt oder zumindest mit dem Porensystem in deren Einzugsbereich in Kontakt stehen.

Für die flächenhafte Untersuchung zum Corg- und Nt-Gehalt wurde ein entsprechendes höhenschichtenangepasstes Raster mit speziellen Tiefenstufen der Beprobung erstellt. Nach AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN (1996) sollen für die Erstellung einer Nährstoffanalyse ca. 20-30 Einstiche pro ha zum Erstellen einer Mischprobe verwendet werden. Für eine von der Schichtung und Horizontierung des Bodens unabhängige Fragestellung sind tiefenstufenbezogene Probenahmen zulässig. Die Untersuchung des Bearbeitungseinflusses stellt eine solche Fragestellung dar. Ziel war die Erfassung der Veränderung der Parameter im Mikrolief mit einem vertretbaren und umsetzbaren Arbeitsaufwand. Hierfür war die Probenanzahl sowie die Art der Herstellung der Mischproben ausreichend. Durch die Herstellung einer Mischprobe aus 3 einzelnen Einstichen war jedoch gewährleistet, dass einzelne Ausreißer nicht überbewertet wurden.

Nach RICHTER (1995) ist bei der Bewertung von Probenahmen mittels Bohrstock die Dichte zu berücksichtigen. In den verschiedenen Bodenbearbeitungsvarianten werden zwar die gleichen Bodentiefen beprobt, aber eine scheinbare Anreicherung kann durch eine höhere Lage-

rungsdichte hervorgerufen sein. Die Dichte wurde in den vorliegenden Berechnungen zum Corg- und Nt-Gehalt berücksichtigt.

Nach VDLUFA (1991) kann sich bei der Bohrstockbeprobung schon kurz nach dem Einstecken ein Pfropf aus Bodenmaterial bilden, der während des Eintreibens des Bohrers den darunter anstehenden Boden seitlich des Schlitzes verdrängt. Um diese Verfälschungen zu vermindern, wurde auf einen geeigneten Bodenzustand und eine saubere Probenahme geachtet.

6.1.2 Methoden der Wasserhaushaltuntersuchungen

Nach TOPP & DAVIS (1985) wird der TDR-Methode eine hohe Genauigkeit bescheinigt. Höhere Wassergehalte können ermittelt werden, wenn sich Wasser am Ende des festinstallierten Glasfaserkunststoffrohres ansammelt. Ein guter Kontakt zwischen den Rohren und dem Messmedium ist dabei unbedingte Voraussetzung. Nachteilige Effekte können sich durch wechselnde Lagerungsdichten und Texturunterschiede ergeben. Durch einen horizontalen Einbau der stationären Rohre, können noch weniger Variationen erreicht werden, da die Messung über einen gesamten Horizont erfolgt.

Vor einer TDR-Messung wurden die Kunststoffrohre auf dem Untersuchungsschlag gereinigt. Aufgrund des elliptischen Messvolumens der Sonde wurde diese 3-mal pro Messtiefe gedreht. Dadurch konnte ein Mittelwert der entsprechende Messtiefe ermittelt werden.

Nach HONISCH (1996) kann bei Tensiometermessungen die Entleerung der Tensiometer unter sehr trockenen Verhältnissen die Ergebnisse verfälschen. Nach dem Öffnen der Tensiometer und dem Wiederbefüllen können größere Zeiträume bis zur Messwertstabilisierung vergehen. Während der wöchentlichen Ermittlung der Saugspannungen wurde auf ein mögliches Leerlaufen der Tensiometer geachtet.

Für die Charakterisierung einer engen begrenzten Fläche wird nach KA 4 (1994) die Auswertung örtlicher Klimastationen empfohlen, da besonders die Niederschläge regional stark schwanken können. Für die Berechnung der ET_{pot} wurde die Formel nach HAUDE verwendet. Die entsprechenden Faktoren entstammen LÖPMEIER (1994). Bei diesen Faktoren wirkt einschränkend, dass sie auf monatliche Zeiträume festgelegt sind. Dadurch wird in den einzelnen Jahren der variierende zeitliche Verlauf der Pflanzenentwicklung nicht erfasst. Nach WENDLING et al. (1991) wird bei der Verwendung der HAUDE-Formel die Zufälligkeit des

Temperaturwertes zum Mittagstermin im Vergleich zum Tagesverlauf der Temperatur als Ungenauigkeit aufgeführt.

Da der Faktor Wind im HAUDE-Verfahren nur als Mittel berücksichtigt ist, wird die Verdunstung an windschwachen und windstarken Tagen geringfügig über- oder unterschätzt. Weiterhin kann es an ausgeprägten Strahlungstagen sowie an bedeckten Tagen zu einer Verfälschung kommen. Daher sollten HAUDE-Werte immer als Summen oder Mittel ausgewertet werden. Für die eigenen Berechnungen wurden Wochen- und Monatssummen verwendet.

Für die Versickerungsberechnung wurde ein vereinfachter Ansatz gewählt, welcher eine Versickerung beim Überschreiten der FK zulässt. Die Berechnung mittels KWB beruht üblicherweise auf der Voraussetzung von ebenen Standorten. In der vorliegenden Arbeit wurde versucht, die vorhandene Oberflächenverhältnisse durch Verwendung des Modells E 2D zu berücksichtigen. Laterale Stoffflüsse konnten nicht berücksichtigt werden. Durch die eigene vereinfachte Modellvorstellung konnte ein Makroporenfluß in den nichtgepflügten Systemen nicht direkt berücksichtigt werden. Die gemessenen Wassergehalte und Wasserspannungen geben jedoch für die jeweilige Bodenbearbeitungsvariante charakteristische Zustände wieder.

Nach EHLERS (1996) kennzeichnet die in der vorliegenden Arbeit verwendete statische Betrachtungsweise nicht ausreichend die physikalischen Grundlagen des Wasserhaushaltes. Es gibt keine physikalisch begründbare qualitative Abgrenzung verschiedener Formen von Bodenwasser. Bei Erreichen der FK hört die Versickerung nicht auf, und das verbleibende Bodenwasser wird vom Boden nicht gegen die Schwerkraft gehalten. Vielmehr bleibt das Bodenwasser auch bei Unterschreiten des Grenzwertes FK in Bewegung, nur wird die Fließrate mit zunehmender Austrocknung und zunehmender Wasserspannung geringer. Bei der Berechnung der Nitratfracht müssen Daten der Sickerwassermenge und der Konzentration der Bodenlösung von möglichst engen Zeitabständen verwendet werden.

Durch eine wöchentliche Auflösung und Kalibrierung des Ansatzes mittels wöchentlich gemessener Wassergehalte wurde in den eigenen Berechnungen eine hohe Genauigkeit erzielt.

6.1.3 Methoden der Reliefanalyse

In einem reliefvierten Gelände, wie im Mittelsächsischen Lößhügelland, sind bei einer Gesamtbetrachtung einer Fläche unterschiedliche Strukturen im Mikrorelief zu berücksichtigen.

Ein auf der TK 10 aufbauendes DGM, konnte für die Einordnung des Untersuchungsschlages in die Mesoebene verwendet werden. Wenn eine flächenhafte Beprobung in einem noch engerem Raster als dem Verwendeten durchgeführt werden soll, kann in dieser Ebene nur mit einem Geländemodell gearbeitet werden, welches vergleichbar mit dem eigenen entwickeltem Modell ist.

6.2 Bewertung der Ergebnisse

In der Variante K wurden die geringsten Nitratausträge aus der Tiefe 60 – 90 cm in 2 Winterperioden ermittelt. Weiterhin konnte in allen nichtgepflügten Varianten eine Humusakkumulation sowohl in der Krume als auch im Unterboden verzeichnet werden. Für den Landwirt steht eine Karte mit entsprechend detaillierten Angaben zum Humusgehalt der Fläche zur Verfügung. Nach diesen Angaben und den Ergebnissen zu Veränderungen im Stickstoffhaushalt zwischen den unterschiedlich bearbeiteten Varianten sollten Düngungsmaßnahmen angepasst werden.

Nach Ausführungen von NEUMEISTER (1989) ist es möglich, bei Messreihen von 10 - 20 Jahren Dauer, bestimmte Gesetzmäßigkeiten zwischen Bewirtschaftung, meteorologischem Ablauf und Parametern des Stoffaustrages zu erkennen. In der vorliegenden Arbeit werden Trends nach 7 Jahren der Umstellung der Bewirtschaftungsintensität in Verbindung mit 3-jährigen Messreihen aufgezeigt. Durch die unterschiedliche Bearbeitungsintensität werden starke Unterschiede im Bodengefüge bewirkt, wodurch veränderte Stoffströme entstehen.

Im Untersuchungsschlag wirken sich unterschiedlich schnell verändernde Merkmale zusammen. Nach NEUMEISTER (1989) werden diese in hoch- und niederfrequente Parameter unterschieden. Dabei wirken in Kurzzeitbetrachtungen die niederfrequenten Parameter als Konstanten. Niederfrequente Parameter sind in dem zu betrachtenden System u.a. die Witterung, der Bodentyp, die Reliefeigenschaften. Als hochfrequente Parameter sind der Humusgehalt, die Lagerungsdichte, die Porengrößenverteilung sowie die Wasser- und Luftleitfähigkeit zu betrachten. Die Fixierung von Stickstoff, das Stickstoffumsatz- und Stickstoffaustragspotenzial kann durch anthropogene Änderung der hochfrequenten Parameter beeinflusst werden.

Nach KÖRSCHENS (1980) ist eine Beziehung zwischen Feinanteil und dem Ct-Gehalt sowie Nt-Gehalt gegeben. Demnach erfolgt bei gleichen Bedingungen eine Humusabnahme mit zunehmender Korngröße. Insgesamt konnte von einer sehr homogenen Verteilung der Korngrö-

ßen innerhalb des Untersuchungsschlages gesprochen werden, womit eine unterschiedliche Beeinflussung von Stoffumsatz- und Stofftransportprozessen zwischen den untersuchten Varianten ausgeschlossen werden konnte.

Die Variante P besaß in den Jahren 1999 und 2000 ab 20 cm bis in den Unterboden die geringsten Dichten. In der Tiefe unter 20 cm wiesen die nichtgepflügten Variante größere Trockenrohdichten als die Variante P auf. RICHTER (1995) fand in der Variante Direktsaat im Vergleich zur Variante Pflug ebenfalls deutlich höhere Trockenrohdichten im Gesamtprofil. Nach KA 4 (1994) wird die Gefährdung des Bodengefüges durch Befahren und Bearbeitung nicht nur von der Feuchtigkeit und dem Tongehalt, sondern auch von der Dichte des Bodens, vor allem des obersten Bodenbereiches, beeinflusst. In den obersten 5 cm lagen die Trockenrohdichten der Varianten D und K über den Trockenrohdichten der Variante P.

Durch die Trockenrohdichte wird der Verdichtungszustand des Bodens wiedergegeben und sie ist damit nach HARTGE & HORN (1989) ein Kennwert des veränderlichen Gefügestandes. Nach LfL (2001) bildet die Trockenrohdichte nach langjähriger differenzierter Bodenbearbeitung, die Bodenbearbeitungsintensität und Bearbeitungstiefe ab. In der Tiefe von 10 cm wurden in den Frühjahrsperioden keine Unterschiede im Wassergehalt zwischen den Varianten ermittelt. In der Tiefe 20 cm lagen die Wassergehalte der Varianten D und K über den Werten der Varianten P. Aufgrund der höheren Trockenrohdichten und des höheren ermittelten Humusgehaltes konnte jedoch allein aufgrund des höheren Wassergehaltes nicht von einer Einschränkung der Befahrbarkeit gesprochen werden. Dem stehen die stabilisierend wirkenden höheren Bodendichten und Humusgehalte gegenüber.

Innerhalb der 3 Untersuchungsjahre konnte eine starke Streuung der Trockenrohdichten ausgemacht werden. Weiterhin wurde im Jahre 2001 der Unterboden nicht beprobt, so dass keine Aussagen zur endgültigen Entwicklung in dieser Tiefe zulässig waren.

Die Variante P besaß in den Jahren 1999 und 2000 die höchsten Werte für die nFK bis in 60 cm Tiefe. Die Schaffung eines gleichmäßigen Porengefüges bis 30 cm Tiefe im Bereich der nFK konnte in der Variante P auf die regelmäßige Bodenbearbeitung mit dem Pflug bis 30 cm Tiefe zurückgeführt werden. Die Variante P besaß in den Jahren 1999 und 2000 auch die geringsten Anteile an den Porenbereichen Totwasser. Die nFK der Variante D lagen im Untersuchungszeitraum ca. 4 Vol.-% und die der Variante K ca. 7 - 9 Vol.-% unter der nFK der Variante P. Nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1998) erreichen die verlagerten Stoffe bei gleicher Sickerwassermenge und sonst gleichen Bedingungen eine bestimmte Tiefe

um so später, je höher die Feldkapazität und damit das Wasserspeichervermögen des Bodens ist. Anhand der ermittelten Verteilung der Porengrößen konnte bei Berücksichtigung der verfügbaren Wassermengen und der Wasserspannungen keine negative Beurteilung der Varianten D und K erfolgen.

Die Variante P war in den Jahren 1999 und 2000 durch deutliche Abnahmen der LK bis in den Unterboden gekennzeichnet. In der Variante KL konnte kein Entwicklungstrend aufgezeigt werden, da hier nur einjährige Messergebnisse zum Porenvolumen vorlagen. Ähnlich wie in der Variante P konnte in der Variante KL eine Abnahme der LK nach unten bedingt durch den Bearbeitungseinfluss festgestellt werden. In den oberen 30 cm wiesen die Varianten P und KL ähnliche Werte der LK auf. Die hohen Werte der LK im Bereich 10 – 15 cm der Variante KL werden nach LfL (2001) auf eingemischtes Stroh zurückgeführt.

Die Werte der LK in den Varianten P und KL lagen deutlich über den Werten der Variante D und spiegeln sich auch in den Trockenrohdichten wieder. Ergebnisse von RICHTER (1995) zeigen, dass trotz des drastisch verringerten Grobporenanteils bei der Direktsaat im Vergleich zur Variante Pflug ähnliche Luft- und Wasserleitfähigkeiten gemessen wurden.

Im Jahr 1999 wurden in der Variante K in den obersten 30 cm höhere Werte der LK als in der Variante P gemessen. Eine starke Verringerung der LK und Erhöhung der Dichte konnten in der Variante K im Jahr 2000 ermittelt werden. In diesem Jahr wurden auch in der Variante K ca. 5 % weniger Ertrag im Vergleich zur Variante P erzielt. Im Jahr 2001 wurden diese Untersuchungen der Dichte und zur Porengrößenverteilung in diesen Tiefen nicht durchgeführt. Anhand einer erhöhten Ertragsentwicklung im Jahr 2001 konnte jedoch vermutet werden, dass die hohen Dichten und geringen nFK in der Variante K keinen längeren Zustand charakterisierten. Als Ursachen können auch kleinräumige Heterogenitäten aufgeführt werden.

Im Zeitraum von April bis Juni 1999 wurden Messungen der Bodentemperatur durchgeführt. Die Werte der nichtgepflügten Varianten lagen in 5 cm Tiefe über denen der Variante P. In diesem Zeitraum wurde in den nichtgepflügten Varianten ebenfalls höhere Bodenfeuchten ermittelt. Die höheren Wassergehalte bedingen aufgrund der geringeren Wärmeleitfähigkeit von Wasser die nicht so starke Auskühlung bei häufigen Temperaturwechseln im Frühjahr in den oberen Bodenschichten. Aus dem sehr kurzen Messzeitraum können keine Trendaussagen getroffen werden. Weiterhin begann der Messzeitraum erst im April. Hier konnte eine Bodenwärmung schon vorangeschritten sein. In Tiefen unter 10 cm wurden keine Temperaturmes-

sungen durchgeführt. Hier könnte der höhere Wassergehalt in den nichtgepflügten Varianten zu einer verzögerten Bodenerwärmung führen.

Im Jahr 2000 wurde bei der Untersuchung der Wasserleitfähigkeit in den nichtgepflügten Varianten in allen Bodentiefen höhere Wasserleitfähigkeiten im Vergleich zur Variante P ermittelt. Die Variante P besaß ihre höchsten Wasserleitfähigkeiten in den Jahren 1999 und 2000 in der Tiefe 32 cm. Hier konnte also nicht von der Ausbildung einer Pflugsohle gesprochen werden. Die höchsten Wasserleitfähigkeiten in beiden Messjahren wies die Variante D auf. Hier wurde auch eine homogene vertikale Verteilung der Wasserleitfähigkeiten im Gesamtprofil ermittelt. In den nichtgepflügten Varianten streuten die Werte der Wasserleitfähigkeiten sehr stark. Die hohen Wasserleitfähigkeiten bei geringeren Luftkapazitäten kennzeichnen in den nichtgepflügten Varianten die hohe Funktionalität des Porensystems. Das Porensystem der nichtgepflügten Varianten war besonders durch die Ausbildung von Makroporen gekennzeichnet. Neben dem Matrixfluss ist der Makroporenfluss für die Höhe der Leitfähigkeit bestimmend. Bei hohem Anteil an vertikal verlaufenden Makroporen ist methodenbedingt eine hohe Streuung der Einzelwerte zu erwarten (Lfl, 2001). Der Wassergehalt stellt beim Makroporenfluß eine sensible Steuergröße dar. LIERMANN (1999) fand bei seinen Freilandtracer-versuchen auf einer Pararendzina aus Löß, dass der unterschiedliche Oberbodenwassergehalt ein Vordringen der Infiltrationsfront stärker beeinflusst, als die Makroporenzahl.

In beiden Entwässerungsstufen wurde bei der Messung der Luftleitfähigkeiten für die Varianten P und KL der Bearbeitungseinfluss in den entsprechenden Tiefen deutlich. So wies die Variante P die höchsten Werte in der regelmäßig gelockerten Schicht bis 20 cm Tiefe auf. Dasselbe konnte für die Variante KL in 40 cm Tiefe ermittelt werden. Da im Jahr 2002 Zuckerrüben angebaut werden, wurde in der Variante KL vor der Aussaat ein Tiefenlockerung in 40 cm Tiefe vorgenommen. Die Variante K wies in beiden Tiefen und in beiden Entwässerungsbereichen die geringsten kl-Werte auf. Nach SCHLICHTING et al. (1995) hängt die Luftleitfähigkeit von der Zahl, der Größe und Kontinuität luftführender Hohlräume einer Bodenlage ab. Die Untersuchung der Luftleitfähigkeit wurde nur einmalig durchgeführt und lässt keine Trendaussagen zu.

Nmin-Gehalte der Bodenproben

Die unterschiedlichen Nmin-Mengen können im Jahresverlauf nur schwer bewertet werden. Ein hohe Nmin-Menge in den einzelnen Monaten liefert noch keine Aussage über deren Pflanzenaufnahme und die Zufuhr von neuem mineralischen Stickstoff. Nach SCHEFFER &

SCHACHTSCHABEL (1998) ist die Fähigkeit eines Bodens den N-Bedarf der Vegetation über die Wachstumsperiode zu sichern von der organischen Reserve im Boden, der Natur der organischen Rückstände und der ammonifizierenden Fähigkeit der mikrobiellen Population abhängig.

In allen Varianten wurde im Profil 0 – 90 cm Tiefe ein C/N-Verhältnis von 10 bis 15 im Untersuchungszeitraum ermittelt. Deshalb konnte davon ausgegangen werden, dass in allen Varianten ein sehr gute Nachlieferung zum aufgenommenem N_{min} erfolgt. Ein Vergleich der N_{min}-Werte zwischen den Varianten war zulässig.

Nach DVWK (1985) finden in dem gemäßigten Klima Mitteleuropas vorwiegend im Sommerhalbjahr die Stickstoffumsetzungen statt. Dabei gibt es zwei Nitrifikationsmaxima, welche in den Monaten Mai und August auftreten. Diese Maxima der Nitrifikation konnten in den eigenen Untersuchungen nicht ermittelt werden.

Der Verlauf der N_{min}-Kurven für den Untersuchungsschlag zeigte Zunahmen der N_{min}-Gehalte nach den Bearbeitungsterminen und einen Abfall in der Vegetationsperiode. Für eine Betrachtung des Einflusses des Witterungsgeschehen in Verbindung mit unterschiedlichen Formen der Bodenbearbeitung wäre ein deutlich längerer Untersuchungszeitraum notwendig.

Der N_{min}-Gehalt im Boden wird hauptsächlich durch das Zusammenwirken von Stickstoffentzug der Kulturart mit der Mineralisation und Düngung bestimmt. Die Variante P wies die höchsten N_{min}-Gehalte im Gesamtprofil 0 – 90 cm in den Jahren 1999 und 2000 auf. Die Werte der Variante P waren im April, Mai und Juni 1999 ca. um 80 kg N/ha höher als in den Varianten D und K. Die N_{min}-Werte der Variante P lagen im Frühjahr 1999 höher als in der Variante KL. Dies war damit begründet, dass in der Variante P im Oktober 1998 eine Grundbodenbearbeitung und im November 1998 eine Frostbearbeitung durchgeführt wird.

Durch die Bearbeitung und die Einarbeitung der Zwischenfrucht wurde ein Mineralisationschub ausgelöst. In den Varianten K und KL fand im August 1998 eine Stoppelbearbeitung statt. In der Variante KL wurde weiterhin eine Grundbodenbearbeitung bis in 40 cm Tiefe durchgeführt, wodurch im Frühjahr höhere N_{min}-Werte im Vergleich zur Variante K vorlagen. Durch die tiefe Lockerung im Herbst und die angeregte Mineralisation wurde in den Varianten P und KL die hohen N_{min}-Werte zum Beginn der Messungen im April erreicht.

Im Jahr 1999 konnte nicht von einer verzögerten Mineralisation der nichtgepflügten Varianten gesprochen werden. Die Erhöhungen und Verringerungen des N_{min}-Gehaltes erfolgten in gleichen Zeitintervallen.

Die höchsten N_{min}-Gehalte traten in allen Varianten im Jahr 1999 auf. Nach Untersuchungen von RIEß (1993) konnten Sommerungen den aus der Frühjahrsmineralisation und von einer Düngung vor oder zur Saat stammenden Stickstoff aufgrund ihrer langsamen Jugendentwicklung und des relativ späten Hauptstickstoffbedarfs nicht sofort entziehen. Daraus resultierten höhere Nitrat-Gehalte im Sickerwasser. Im Jahr 1999 wurden auf dem Untersuchungsschlag Lüttewitz Zuckerrüben angebaut. Im Herbst 1998 wurde die Fläche mit Senf als Zwischenfrucht bestellt. Aus dem Zwischenfruchtanbau und dem späteren N-Entzug durch Zuckerrüben können der hohen N_{min}-Werte 1999 resultieren. Nach BUCHNER & KÖLLER (1990) sind die Humus- und Stickstoffakkumulation, die Verringerung der Nährstoffverlagerung und Erosion sowie eine Unterbodenlockerung die Vorzüge eines Zwischenfruchtanbaus.

Im Jahr 2000 waren die N_{min}-Gehalte im Profil 0 – 90 cm Tiefe der Variante P von Beginn des Jahres bis Ende März höher als in allen anderen Varianten. Die nichtgepflügten Varianten wiesen aufgrund der fehlenden oder nicht so tiefen Grundbodenbearbeitung im Oktober 1999 eine geringere N-Mineralisation zu Beginn des Anbaujahres auf.

Im Jahr 2001 waren die N_{min}-Gehalte des Gesamtprofils der Variante P ähnlich den Gehalten der Varianten K und KL. Deutlich erhöhte Werte der Variante D im Vergleich zu den anderen Varianten waren im Anbaujahr 2001 erkennbar. Die N_{min}-Gehalte der Variante D lagen im Vergleich zu den Varianten P, K, und KL um 40 – 100 kg N/ha höher. Die hohen N_{min}-Gehalte des Jahres 2001 waren fast ausschließlich durch den Nitratgehalt geprägt. In den Jahren 2000 und 2001 wurde jeweils Winterweizen angebaut. Trotzdem traten in der Variante D nur im Jahr 2001 erhöhte N_{min}-Werte auf. Aus der Schlagkartei wurde erkennbar, dass im Jahr 2001 ca. 15 kg N/ha mehr als im Vorjahr gedüngt wurden. Im November 2000 wurde in der Variante D aufgrund eines schlechten Feldaufgangs noch einmal nachgesät. Dies könnte einen geringeren oder verzögerten N-Entzug der Kulturpflanzen im Jahr 2001 begründen.

Von Oktober 2000 bis Februar 2001 wurden sehr geringe Niederschläge ermittelt. Im Jahr 2001 waren die Monate März, April, Juni und Juli im Vergleich zu den anderen Jahren sehr regenreich. Weiterhin konnten im Frühjahr 2001 die geringsten Frühjahrstemperaturen im Untersuchungszeitraum ermittelt werden. Wahrscheinlich war die Bodenfauna unter den Bedingungen einer Direktsaat eher in der Lage eine entsprechend hohe Mineralisation und Nitrifikation zu gewährleisten. Bei der Betrachtung der Anteile von NH₄ und NO₃ am Gesamtgehalt wurde erkennbar, dass im Jahr 2001 die Varianten P, K und KL besonders in den Tiefen

unter 30 cm im Vergleich zur Variante D erhöhte NH_4 -Anteile aufwiesen. Dies lässt auf ungünstigere Nitrifikationsbedingungen in den Varianten P, K und KL im Jahr 2001 schließen.

Das der in den vorrangegangenen Jahren beobachtete größere Mineralisationsschub in der Variante P im Jahr 2001 ausblieb, war durch die sehr trockene Witterung in den Herbst- und Wintermonaten und das Fehlen einer Zwischenfrucht begründet.

Es konnte erkannt werden, dass im Frühjahr in der Variante P, bedingt durch die geförderte herbstliche Mineralisation, erhöhte N_{min} -Werte im Vergleich zu den Varianten D, K und KL auftraten. Die Unterschiede im N_{min} -Gehalt zwischen den Varianten waren größer, wenn Zwischenfrüchte angebaut und diese im Herbst eingearbeitet wurden. In den vorhergehenden Winterperioden besteht dadurch eine verstärkte Nitratstragsgefahr. Für einen Winterzeitraum nach Zwischenfruchtanbau lagen keine Messungen vor. Anhand der N_{min} -Werte im Frühjahr und den Berechnungen der Nitratfracht wird aber unbedingt empfohlen, auf eine Einarbeitung der Zwischenfrüchte im Herbst zu verzichten. Nach DVWK (1985) wird durch den Zwischenfruchtanbau und die anschließende Gründüngung eine Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit und Verbesserung der Bodenstruktur erreicht. Dies sollte gerade im Mittelsächsischen Lößhügelland im Hinblick auf die gegebene Erosionsanfälligkeit berücksichtigt werden. Durch eine länger vorhandene Pflanzendecke wäre weiterhin eine Aufnahme von Nitrationen und durch den erhöhten Wasserverbrauch eine Verringerung der Sickerwassermenge gegeben.

Die geringeren N_{min} -Gehalte in den nichtgepflügten Varianten müssen besonders nach Zwischenfruchtanbau bei der 1. N-Gabe berücksichtigt werden. Untersuchungen von RIEß (1993) bestätigen, dass eine umso geringere N-Auswaschungsgefahr besteht, desto besser die Düngergaben zeit- und mengenmäßig an den physiologischen Stickstoffbedarf der Kulturen angepasst waren und je besser der N-Pool des Bodens berücksichtigt wird.

Der N_{min} -Gehalt im Gesamtprofil war in allen Varianten deutlich durch den N_{min} -Gehalt der Schicht 0 - 30 cm geprägt. Nach Bodenbearbeitungs- bzw. Düngungsmaßnahmen betragen die Anteile dieser Schicht ca. 50 - 75 %. GROFFMANN (1984) fand bei seinen Untersuchungen auf sandigem Lehm, eine erhöhte Nitrifikation und Denitrifikation in den oberste 5 cm in einer Direktsaatvariante gegenüber einer konventionell bearbeiteten Variante. Er führt diese Ergebnisse der erhöhten Nitrifikation auf eine höhere NH_4 -Verfügbarkeit, einen höheren pH-Wert und die höhere Bodenfeuchte zurück. Unter dieser Tiefe kehrten sich die Verhältnisse

um. Vergleichend zu anderen Untersuchungen führt er an, dass die Effekte der Bodenbearbeitung auf die Nitrifikation jedoch sehr von den spezifischen Feldbedingungen abhängen.

In den Tiefen 30 - 60 cm war deutlich der Einfluss einer Tiefenlockerung zu erkennen. Hier wiesen die Varianten P und KL die höchsten N_{min}-Gehalte im Frühjahr auf. Eine Ausnahme bildet auch in diesen Tiefen die Variante D mit deutlich erhöhten Gehalten im Jahr 2001. Die hohen N_{min}-Gehalte der Variante D im Jahr 2001 traten auch im Unterboden auf.

Nach KOHL (1989) wird bei hohen Niederschlägen durch den Bypass-Effekt bei Makroporen Nitrat in den Matrix- und Mikrostrukturen konserviert. In der Variante D war durch die größte Bodenruhe die Anzahl an Makroporen am größten. Dies belegen Untersuchungen von UHLIG (2001) auf dem Schlag Lüttewitz. Durch einen erhöhten Bypass-Effekt im Vergleich zu den anderen Varianten ist die Möglichkeit von höheren N_{min}-Mengen in den Bodenproben der Variante D gegeben. Damit könnten die hohen N_{min}-Werte der Variante D im April und Juni 2001 aufgrund hoher Niederschläge erklärt werden. Die Starkniederschläge können zu einer Verschlammung der Bodenoberfläche in der Variante P geführt haben, wodurch die Durchlüftung behindert wurde.

APEL & FRANKEN (1990) untersuchten auf 3 Standorten die unterschiedlichen Auswirkungen von Bodenbearbeitung mittels Pflug und Parapflug auf die Nitratdynamik. In der Variante Pflug wurden an 2 Standorten im Herbst höhere Nitrat-Gehalte in der Tiefe 0 - 90 cm ermittelt. An einem Standort wurden in der reduziert bearbeiteten Variante höhere Gehalte im Verlauf der Messperiode gemessen. Dies wurde mit der raschen Wiederverdichtung des Bodens in der Pflugvariante und den damit für die Mineralisation ungünstigen Bedingungen begründet.

Eine Möglichkeit für die hohen N_{min}-Werte der Variante D im Jahr 2001 könnte auch in der ungleichmäßigen Verteilung von Düngermengen liegen.

In der Variante D erfolgte im Vergleich zur Variante P keine Stoppelbearbeitung. Bei einer einsetzenden Mineralisierung nach einer Befeuchtung wird der freigesetzte Stickstoff nicht von keimenden Ausfallsamen aufgenommen und konnte sich so anreichern. RICHTER (1995) ermittelte bei seinen Untersuchungen im Frühjahr auf einer Parabraunerde höhere N_{min}-Werte der Variante D im Vergleich zur Variante P gefunden. Es werden hier eine länger anhaltende und intensivere Mineralisierung sowie eine geringere pflanzliche Aufnahme in der Variante D als mögliche Gründe angeführt.

Weiterhin wurden Reste (Stroh) nach der Ernte des Winterweizens im Jahre 2000 auf der Oberfläche zurückgelassen. Diese Reste wurden langsam durch Regenwürmer in den Boden und die Regenwurmgänge eingearbeitet. Für die Umsetzung herrschten nach einer Befeuchtung in den Regenwurmhängen bei optimalen Durchlüftungsbedingungen hervorragende Umsetzungsbedingungen. Diese Bedingungen können zum Anstieg der Nmin-Werte ohne einen lockernden Eingriff in den Boden führen. Diese Erläuterung führt RICHTER (1995) für eine Stallmistgabe auf der Variante D an.

Die hohen Nmin-Werte in der Variante D wurden im Jahr 2001 gemessen. Im Jahr 2000 waren solche hohen Nmin-Werte nicht zu verzeichnen. Das hohe C/N-Verhältnis bewirkt zunächst eine biologische Immobilisierung von Stickstoff. Erst nach dem Absterben der Mikroorganismen ist im Folgejahr eine Steigerung des Nmin-Gehaltes möglich. Ob die hohen Nmin-Werte auf diesen Sachverhalt zurückzuführen sind, wäre erst bei einer Betrachtung eines nochmaligen Anbaus von Getreide nach Getreide erkennbar.

Es wird deutlich, dass die Aussagen, welche sich aus einem 3-jährigen Messzeitraum ableiten lassen, begrenzt sind. Weiterhin wäre vor allem eine Entwicklung innerhalb der Fläche von besonderem Interesse, da gerade stationäre Messplätze nur einen Einzelwert im Raum verkörpern und von diesem Aussagen zur Fläche schwierig sind.

Ca. 90 - 95 % des Nmin-Gehaltes wurde in allen Varianten durch den Nitratgehalt geprägt. Bei den ermittelten Ammoniumgehalten wurden zwischen den Varianten nur geringe Unterschiede festgestellt. Dies ist durch die sehr guten Mineralisationsbedingungen in allen Varianten begründet, welche eine Anreicherung von Ammonium verhindern. Diese Bedingungen waren durch die engen C/N-Verhältnisse definiert. Bei der Betrachtung der Zusammensetzung des Nmin-Gehaltes wurde erkennbar, dass die Variante P am häufigsten hohe NH_4 -Anteile in der Tiefenstufe 0 - 30 cm und hohe NO_3 -Gehalte in den Tiefenstufen 30 - 60 cm und 60 - 90 cm aufwies. Die Variante D zeichnete sich am häufigsten durch hohe Nitratanteile in der Tiefenstufe 0 - 30 cm auf. Die höheren NH_4 -Anteile in der Krume der Variante P können nach KRÜCK et al. (2001) auf eine geringere mikrobielle Biomasse aufgrund der Bodenwendung zurückzuführen sein.

Nach STREBEL et al. (1984) hängt die Verlagerungstiefe von oberflächennahem Nitrat in der Periode zwischen Herbst und Frühjahr von der Grundwasserneubildung und der Feldkapazität ab. Befindet sich verlagertes Nitrat im Frühjahr noch im Wurzelraum der neuen Vegetations-

periode, kann es durch Wurzeln aufgenommen werden. Nitrat auswaschungen in anderen Perioden können nach Angaben der Autoren durch größere Wasserbilanzüberschüsse, geringere Feldkapazitäten und einen späten Bestandsschluss auftreten. Nach SPECHT & STOCK (1994) wiesen die Nitratgehalte auf einem Lehmboden einen deutlichen Jahresrhythmus auf. So wurden höhere Gehalte im Frühjahr gemessen. Anschließend fand ein Entzug in der Vegetationsperiode statt. Das Minimum wurde im Herbst nach der Ernte ermittelt. Im weiteren Jahresverlauf verstärkte die wiedereinsetzende Durchfeuchtung die einsetzende Mineralisierung aus Ernte- und Wurzelrückständen. Im Winter wird Nitrat durch fehlenden Pflanzenentzug mit dem abwärtsgerichteten Wasserstrom in tiefere Bodenschichten verlagert.

Dieser Jahresrhythmus wurden auch in der eigenen Untersuchung gefunden.

Bodenlösungen

Die Probenahme von Bodenlösungen erfolgte jeweils im Frühjahr 2000 und 2001. Im Jahr 2000 lagen die Nmin-Gehalte in den Bodenlösungen der Variante P über den Gehalten der Varianten D, K und KL. Die Unterschiede betragen ca. 5 - 10 mg/l aus. Ab Mitte April bis zum Ende der Messperiode im Juni 2000 traten kaum noch Unterschiede zwischen den Varianten P, K und KL auf. Ein ähnlicher Kurvenverlauf konnte auch bei der Auswertung der Bodenproben ermittelt werden. Die Nmin-Gehalte der Bodenlösungen waren in den Varianten P, K und KL im Jahr 2001 geringer als im Jahr 2000.

Im Jahr 2001 wies die Variante D deutlich erhöhte Nmin-Gehalte in den Bodenlösungen auf. Diese lagen im März bis April 2001 ca. 15 - 20 mg/l, und von Ende April bis Juni 2001 ca. 30 - 40 mg/l über den Gehalten der Varianten P, K und KL. Den Hauptteil am Nmin-Gehalt der Bodenlösung bildeten die NO₃-Gehalte. Die Nitrat-Gehalte wurden anhand von Gefährdungsklassen für Sickerwasser nach FREDE & DABBERT (1998) beurteilt. Im Jahr 2000 fielen die ermittelten Nitrat-Gehalte der Bodenlösungen von ca. 10 mg NO₃-/l in den nichtgepflügten Varianten in der Klasse sehr gering. Die Nitratgehalte der Variante D konnten im Jahr 2001 in die Klassen mittel bis hoch eingestuft werden.

Es wurden in allen Varianten nur geringe Ammoniumgehalte von durchschnittlich 1 mg NH₄⁺/l in den Bodenlösungen ermittelt. Aus den ermittelten Ammoniumgehalten konnte nicht auf ein höheres Denitrifikationspotenzial der nichtgepflügten Varianten aufgrund des höheren Wassergehaltes geschlossen werden. Ähnlich geringe NH₄-Gehalte und Unterschiede zwischen den Bearbeitungsvarianten Pflug, Flügelschargrubber und Direktsaat fand RICHTER (1995) auf einer Parabraunerde aus Lößlehm. Nach Untersuchungen von KUNTZE (1983)

nimmt die Denitrifikation bei Bodentemperaturen unter 10 °C rapide ab. Deshalb findet im Winter trotz Nässe und Luftmangel Denitrifikation nur in geringem Maße statt.

In den feuchteren Herbst- und Frühjahrsmonaten konnten auf dem Untersuchungsschlag keine erhöhte NH_4 -Gehalte gemessen werden. Die erhöhten NH_4 -Gehalte wurden durch den Bearbeitungseinfluss ausgelöst.

Die ermittelten Nitratgehalte der Bodenlösungen aus 90 cm wurden den Gehalten der Bodenproben der Tiefe 60 - 90 cm vergleichend gegenübergestellt. Eine direkte Vergleichbarkeit konnte jedoch nicht gewährleistet sein, da die Methoden Ergebnisse unterschiedlicher Stufen der Stoffumsatz- und Stofftransportprozesse erfassen. Bei der Betrachtung der Trends ergab sich jedoch ein ähnliches Bild. Eine Ausnahme bildete ein Messtermin im Mai 2000 in der Variante D. In den Bodenproben der Tiefe 60 – 90 cm wurde nur ein geringer NO_3 -Gehalt gemessen. Durch die Saugkerzen wurde jedoch eine Erhöhung der NO_3 -Gehalte zu allen Messterminen im Mai 2001 ermittelt. Da die NO_3 -Gehalte der Bodenproben in der Tiefe 0 – 30 cm ebenfalls erhöht waren, kann eine ausgeprägte Verlagerung von Bodenlösung aus der oberen Tiefe im Makroporensystem als Ursache angenommen werden.

Nach RIEß (1993) unterliegt das mit Saugkerzen gewonnene Bodenwasser im Vergleich zu den N_{min} -Anteilen von Bodenproben eher der Versickerung. Saugkerzen entziehen dem Boden primär leicht bewegliches Wasser aus den gröberen Poren. Da bei der Untersuchung der Bodenproben wird auch langsam und kaum bewegliches Bodenwasser aus Mittel- und Feinporen gewonnen. Dies kann aufgrund der dort stärker stattfindenden Mineralisation und längeren Verweilzeit höhere Nitratkonzentrationen aufweisen.

Die nach den Gehalten der Saugkerzen errechnete N-Auswaschung bildet dadurch ein wirklichkeitsgetreueres Bild ab.

Die gemessenen N_{min} -Gehalte kennzeichnen das Produkt von Stoffumsatzprozessen. Für die Möglichkeit von Stoffumsatzprozessen sind entsprechende pH-Werte Voraussetzung. Nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1998) liegen die günstigen Bereiche für die Mineralisation und Nitrifikation im Bereich pH 7. Dies wurde durch die Varianten K und KL in den Tiefen bis 20 cm und in der Variante D bis 10 cm Tiefe in dem Jahr 2000 besser erreicht als in der Variante P. Unter diesen Tiefen erfolgt ein abrupter Abfall des pH-Wertes in den nicht-gepflügten Varianten. Einen ähnlichen abrupten Abfall des pH-Wertes fand RICHTER (1997) bei seinen Untersuchungen in der Direktsaatvariante. Er führt dies auf die fehlende Wendung und Mischung des Bodens und der damit verbundenen Konzentration von mikrobiellen Akti-

vitäten in den obersten Zentimetern zurück. Dieser Sachverhalt wurde von KRÜCK et al. (2001) auch für den Standort Lüttewitz bestätigt. Nach GÖRLITZ (1990) erfolgt ein Nachlassen der Nitrifikationsaktivität im schwach sauren Bereich. Weiterhin ist eine Zunahme der Nitrifikation mit steigendem Gehalt des Bodens an OBS zu verzeichnen.

Da ein Absinken des pH-Wertes unter 20 cm Tiefe auch in der Variante KL ermittelt wurde, kann davon ausgegangen werden, dass die entsprechenden pH-Verhältnisse nur durch den Pflugeinsatz erreichbar waren. In den unteren Tiefen wies die Variante P günstigere pH-Verhältnisse auf. Diese günstigen pH-Verhältnisse fördern eine schnellere Mineralisation, wodurch die entstehenden Stoffe besonders in den unteren Tiefen dem Austrag unterlagen können. Die Schwankungen des pH-Wertes waren innerhalb und zwischen der Varianten sehr gering und bewegen sich nach KA 4 (1994) in den Bereichen schwach sauer bis sehr schwach alkalisch. Durch den vorherrschenden pH-Wert wird die selektive Aufnahme von Ionen durch die Pflanze geregelt. In der Praxis dominiert die NO_3 -Aufnahme im stark sauren bis schwach alkalischen Bereich (FACHVERBAND STICKSTOFFINDUSTRIE e.V., 1961).

Humusgehalte - stationäre Messplätze

In Verbindung zum Stickstoffhaushalt wurde die Entwicklung des Humusgehaltes an stationären Messplätzen betrachtet. Der Humusgehalt wurde nach KA 4 (1994) aus dem Corg-Gehalt errechnet. Der Kohlenstoffgehalt ist nach KÖRSCHENS et al. (1997) nahezu mit allen chemischen, physikalischen und biologischen Bodeneigenschaften eng korreliert. Er bestimmt maßgeblich den N-Kreislauf und damit das Ausmaß des N-Eintrages in die Atmosphäre, das Grundwasser und beeinflusst den CO_2 -Haushalt. Die Autoren schreiben für die Umsetzungsgeschwindigkeit der chemischen und strukturellen Zusammensetzung der organischen Primärsubstanz (OPS) größere Bedeutung zu, als der Charakterisierung der organischen Bodensubstanz (OBS) durch das C/N-Verhältnis.

Nach KÖRSCHENS (1990) wird die organische Substanz des Bodens durch den Ct- und Nt-Gehalt charakterisiert. Das C/N-Verhältnis beeinflusst entscheidend die N-Bereitstellung für die Pflanzen und das Ausmaß der N-Verluste durch Verlagerung und Denitrifikation. Dabei gehen Veränderungen der Ct- und Nt-Gehalte sehr langsam vor sich und sind innerhalb weniger Jahre kaum messbar.

Das C/N-Verhältnis im Ap-Horizont ertragreicher Böden liegt nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1998) liegt das meist bei 10 - 12. Für die Vergleichbarkeit der Werte

des Humus- und Stickstoffgehaltes wurde eine Grundfläche der Bodensäule gewählt. Dadurch sind Angaben in kg/m^2 und t/ha möglich. Diese Werte verwischen zwar die natürliche Differenzierung des Bodens in Horizonte, aber sie sind nützlich, wenn man einzelne Merkmale vergleichen will (SCHLICHTING et al., 1995).

In der Variante P war in allen 3 Jahren bis 30 cm Tiefe ein relativ homogener Humusgehalt zu beobachten. Dieser Humusgehalt lag in den Jahren 1999 bis 2001 bei ca. 1,75 Gew.-% bis in die Tiefe 30 cm. Die homogene Verteilung wurde durch die Wendung dieser Bodenschicht mit dem Pflug hervorgerufen. Die einhergehende Durchlüftung führt zu einer verstärkten Mineralisation. Die höheren Humusgehalte der Krume in den Varianten P und KL konnten auf die intensivere Lockerung zurückgeführt werden. Dabei schien es für diesen Aspekt gleichgültig, ob die Bearbeitung mit dem Pflug oder Grubber erfolgte.

In den tieferen Bodenschichten 30 - 60 cm und 60 - 90 cm nahmen die Humusgehalte in allen Varianten deutlich ab. Dies ist durch den geringeren Anfall organischer Stoffe und die fehlende anthropogene und biogene Einmischung dieser Stoffe begründet. In den tieferen Bodenschichten wies die Variante P an den stationären Messplätzen im Vergleich zu den Varianten D, K und KL die höheren Humusgehalte auf. Die Gehalte lagen im Bereich sehr schwach humos. Eine Humusanreicherung an den stationären Messplätzen war in den konservierend bewirtschafteten Varianten im Unterboden nicht zu beobachten. Bei Berücksichtigung der Dichten lagen die Werte der Krume in allen Varianten bei ca. 72 t/ha auf gleichem Niveau.

Die höchsten Humusgehalte waren in jeder Bodenbearbeitungsvariante in den obersten Bodentiefen zu finden. Hier wird durch die Bodenbearbeitung und durch die einhergehende Durchlüftung zwar die Mineralisation gefördert, jedoch machen sich in diesen Tiefen Düngungsmaßnahmen und anfallendes organisches Material am ehesten bemerkbar. In der Variante D war eine gestaffelte Abnahme der Humusgehalte unter der Bearbeitungstiefe von 5 cm zu erkennen. In den obersten 5 cm Boden wurden in der Variante D in allen 3 Jahren die höchsten Humusgehalte erreicht. Eine Zunahme des Gesamtkohlenstoffgehaltes konnte von FRIELINGHAUS et al. (1997) in den obersten 10 cm bei nichtwendender Bearbeitung auf einem lehmigen Sandboden bei entsprechender organischer Düngung in einem Langzeitexperiment nachgewiesen werden. Nach LfL (2001) hat eine verminderte Bodenbearbeitungsintensität häufig eine Zunahme des Humusgehaltes zur Folge und führt, in Abhängigkeit von der Bearbeitungstiefe, zu einer veränderten Verteilung im Boden. Mit abnehmender Bearbeitungstiefe verschiebt sich dabei der Akkumulationshorizont immer weiter nach oben.

Optimale Humusgehalte von Ackerböden treten nach KÖRSCHENS (1995) in einen begrenzten ökologischen Optimalbereich auf. Unterhalb dieses Bereiches sind Bodenfruchtbarkeit, Ertrag und CO₂-Bindung unzureichend. Oberhalb des Bereiches treten umweltbelastende Verluste an Kohlenstoff und Stickstoff auf. Für die Frage nach optimalen Humusgehalten ist der umsetzbare Anteil von Interesse. Dazu muss eine Differenzierung der C- und N-Gehalte in eine inerte und eine umsetzbare Fraktion erfolgen. Dies wurde in der vorliegenden Untersuchung nicht durchgeführt. Es wurden der Corg- und Nt-Gehalt bestimmt, welche für einen ersten Vergleich der Bearbeitungssysteme geeignet waren. Nach Ausführungen von KÖRSCHENS (1997) beziehen sich die Veränderungen des Corg-Gehaltes fast ausschließlich auf den umsetzbaren Anteil.

Humusgehalte im Mikorelief

Zum Vergleich zu den Humusgehalten der stationären Messplätze wurden die Parameter Corg und Nt durch eine flächenhafte Beprobung untersucht. Nach KUNTZE (1985) hat der Mensch durch Bodenbearbeitung und Düngung in den geschlossenen Kreislauf von Humusbildung, -akkumulation, Humusabbau und Mineralisation eingegriffen. Eine Änderung des Humusgehaltes in der Krume hat weitreichende Folgen, z.B. für die Nährstoffverfügbarkeit, die Durchlüftung und die Stabilität der Bodenaggregate (Lfl, 2000).

Insgesamt lagen die Humusgehalte der Variante P in der Tiefenstufe 0 –5 cm deutlich unter den Gehalten der anderen Varianten. Die Werte der Varianten D, K und KL bis 5 cm Tiefe fielen in die Klasse mittel humos (KA 4, 1994), wobei die Variante K mit durchschnittlich 2,4 Gew.-% die höchsten Werte aufwies. In der südlichen Senke war in dieser Tiefenstufe in den Bodenbearbeitungsvarianten P, D und KL eine Zunahme des Humusgehaltes zu verzeichnen. Insgesamt war der Reliefeinfluss in allen Bodenbearbeitungsvarianten erkennbar. Als Reliefeinfluss wurde die deutliche Erhöhung von Humusgehalten oder Nt-Gehalten in Senkenbereichen oder die Verringerung dieser Gehalte in Kuppenbereichen verstanden. Ob dieser Einfluss in den einzelnen Varianten jedoch stärker oder schwächer auftritt, konnte mit der einmaligen flächenhaften Probenahme nicht beurteilt werden. Für die Beantwortung dieser Fragestellung müsste eine flächenhafte Beprobung in mehreren Zeitschnitten durchgeführt werden.

Auch in der Tiefe 5 - 30 cm wies die Variante P nahezu vollständig die geringsten Humusgehalte auf. Die Werte der Variante D lagen auf einem ähnlichen Niveau wie die der Variante P. Die geringsten Variationen der Humusgehalte in der Tiefe 5 – 30 cm waren in den Varianten

K und KL erkennbar. Dies ist einerseits durch die ähnlich zur Variante P tiefere Durchmischung des Bodens gegeben. Andererseits wirkt die erosionsmindernde Mulchdecke einem Materialversatz entgegen. Die Durchmischung des Bodens erfolgt anthropogen durch Bodenbearbeitung und durch das im Vergleich zur Variante P erhöhte Bodenleben.

Insgesamt wiesen die nichtgepflügten Varianten in der Krume höhere Gehalte im Vergleich zur Variante P auf. Bei Berechnung der Humusmengen unter Berücksichtigung der höheren Dichten der nichtgepflügten Varianten ergaben sich deutliche Unterschiede. Die Mengen in den Varianten D und K lagen jeweils ca. 24 t/ha über dem Gehalt der Variante P in der Krume. Die Variante KL wies noch einen ca. 11 t/ha höheren Humusgehalt als die Variante P in der Krume auf. In der Variante D wird dabei der Humusgehalt der Krume stark von dem Gehalt der obersten 5 cm geprägt.

Der Humusgehalt in der obersten Bodenschicht beeinflusst die Erosionsanfälligkeit.

Nach RICHTER & TEBRÜGGE (1997) erfolgte durch eine reduzierte Bodenbearbeitung eine Erhöhung der organischen Substanz, wodurch in den obersten Bodenschichten die Ausbildung stabiler Ton-Humuskomplexe möglich war. Durch eine aufliegende Mulchschicht wird die kinetische Energie der auftreffenden Regentropfen vermindert. Die Erhöhung des Corg-Gehaltes führt zur Stabilisierung der einzelnen Aggregate und der Aggregate im Gefügeverband (NITZSCHE et al., 2001). Der Anteil der wasserstabilen und irreversiblen Bindungen nimmt zu und die Setzung des Bodens nach der Bodenbearbeitung und infolge Befahrens des Ackers wird dadurch deutlich vermindert. Die Scherfestigkeit erhöht sich. Bedeutend höher ist auch die Infiltrationsleistung von Böden mit hohem Anteil an organischem Kohlenstoff. Dies ist aufgrund des größeren Aggregatporenvolumens und Makroporenanteils durch Wurzelröhren und Wurmgänge gegeben. Je höher der Corg-Gehalt ist, desto langsamer zerfallen die Bodenaggregate und desto größer sind die abgelösten Aggregatbruchstücke (ZHANG, 1991). Durch einen hohen Humusgehalt ist nach BUCHNER & KÖLLER (1990) eine bessere Erwärmung des Bodens gewährleistet.

Nach Beregnungsversuchen der LfL auf dem Schlag Lüttewitz zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Fruchtfolge ZR-WW-WW war eine deutliche Verminderung des Oberflächenabflusses und der Erosion in den nichtgepflügten Varianten gegeben. Nach LfL (2001) konnte durch Direktsaat ein um ca. 90 % verringerter Oberflächenabfluss im Vergleich zu Variante P ermittelt werden. Die Werte der Varianten K und KL lagen im Mittel, jedoch deutlich unter den

Abflusswerten der Variante P. Dies bedeutet einen geringeren Abtrag von organisch gebundenem Stickstoff in der Oberkrume.

Das die tiefe durchmischende Wirkung des Pfluges eine homogene Verteilung des Humusgehaltes in der Krume hervorruft, konnte durch die 3-jährige Auswertung der an den stationären Messplätzen ermittelten Humusgehalte bestätigt werden. Diese Werte wurden jedoch an einer Messstelle im Raum des Untersuchungsschlages ermittelt. Anders sehen die Verhältnisse aus, wenn man die flächenhafte Verteilung des Humusgehaltes im Mikrorelief betrachtet. Hier konnte ein Oberflächeneinfluss ermittelt werden. Dieser bewirkte in der Variante P deutliche Verringerungen des Humusgehaltes im Oberhang- und Mittelhangbereich. In diesen Bereichen fielen die Humusgehalte auf Werte kleiner 1,5 Gew.-% ab. Diese Erscheinung trat in diesem Ausmaß in keiner anderen untersuchten Variante auf.

Ebenfalls größere Verränderungen der Humusgehalte im Mikrorelief war in der Variante KL zu verzeichnen. Die Mulchauflage und die stabilere Aggregatstruktur an der Oberfläche verhindern jedoch stärkere erosionsbedingte Humusabträge wie in der Variante P.

Besonders in den ausgeprägten Dellenstrukturen des Mittelsächsischen Lößhügellandes können Erosionsereignisse auf konventionell bestellten Flächen zu schwerwiegenden Verlusten an Bodensubstanz und somit an Ertragspotenzial führen. Dies bestätigen Ergebnisse der Untersuchungen von SELLE (2001) im Mittelsächsischen Lößhügelland.

Nach DOLESCHEL (1992) können deutliche Ertragsunterschiede im Hangverlauf im Mittelsächsischen Lößhügelland ausgemacht werden. Am Hangfuß traten beim Anbau von Zuckerrüben und Sommerweizen deutlich höher Erträge auf. Dies wurde auch für einen weiteren Versuchsstandort der LfL im Mittelsächsischen Lößhügelland nach 10-jährigen Ertragserhebungen bestätigt (NITZSCHE, 2002).

Für den Landwirt ist jedoch auch eine mögliche Humusakkumulation in der Tiefe von Interesse. Dies bedeutet eine nachhaltige Bodenbewirtschaftung und stellt zusätzliches Nährstoffkapital für die Kulturpflanzen dar. Unter Berücksichtigung der höheren Dichten wurde in den Varianten K und KL eine Humusakkumulation in der Tiefe 30 – 60 cm ermittelt. Die Gehalte lagen in dieser Tiefe bis zu 16,5 t/ha bzw. 10,5 t/ha höher als die Werte der Variante P.

C/N-Verhältnis

Das C/N-Verhältnis wurde zur Beurteilung eventueller Unterschiede in den Umsatzgeschwindigkeiten der OBS untersucht. Die Veränderungen der C- und N-Gehalte im Boden verlaufen nach Ausführungen von KÖRSCHENS (1997) sehr langsam. Dabei hängen die Dauer und die Richtung vom Ausgangszustand ab. Ob der organisch gebundene Stickstoff aus der stetig fließenden Stickstoffquelle der Pflanze zur Verfügung steht, hängt im starken Maß vom C/N-Verhältnis des Bodens ab. Nach KUNTZE (1985) ist das mikrobiell wichtige C/N-Verhältnis der Gradmesser für die Qualität der organischen Bodensubstanz. Ist der Stickstoffgehalt hoch, geschieht die Zersetzung schnell und die Nährstoffe werden schnell pflanzenverfügbar (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 1998). Nach KA 4 (1994) beinhaltet ein engeres C/N-Verhältnis, einen größeren Huminsäureanteil an der organischen Bodensubstanz, was eine höhere Kationenaustauschkapazität (KAK) bewirkt.

Im Mittel wurden in allen Varianten in den 3 Untersuchungsjahren C/N-Verhältnisse von 9 ermittelt. Dieser Wert fällt nach KA 4 (1994) in die Klasse sehr hoch und kennzeichnet somit gute Umsatzbedingungen. Die niedrigsten C/N-Verhältnisse konnten in allen Varianten im Jahr 2001 verzeichnet werden. Die Variante K wies im Mittel in den 3 Untersuchungsjahren mit dem Wert 8 die günstigsten C/N-Verhältnisse in allen Tiefen aus.

Wie CLAUPEIN & BAEUMER (1990) mit ihren Untersuchungen belegen, reichert sich organisch gebundener Stickstoff bei reduziert bearbeiteten Systemen bis zum Erreichen eines neuen Fließgleichgewichtes an. Niedrigere Mineralisationsraten werden hierbei durch einen größeren Vorrat an organisch gebundenem Stickstoff ausgeglichen.

Die Varianten D und K wiesen in der Krume ca. 1,5 t/ha bzw. 1,1 t/ha mehr Nt als die Variante P auf. In allen nichtgepflügten Varianten war besonders durch Berücksichtigung der höheren Dichte in den Tiefen unter 30 cm eine Corg- und Nt-Akkumulation festzustellen. Dadurch stieg auch das C/N-Verhältnis an, da die Corg-Gehalte in größeren Relationen als der Nt-Gehalte zunahmen. Der Reliefeinfluss war in allen Varianten durch Änderung der C/N-Verhältnisse in Senken- und Kuppenbereichen erkennbar. Insgesamt verliefen die Zunahmen der Corg- und Nt-Gehalte relativ simultan. Es traten teilweise gegenläufige Ergebnisse auf. Nach Aussagen des FACHVERBANDES STICKSTOFFINDUSTRIE e.V. (1961) sind die proportionalen Zu- oder Abnahmen des C- und N-Gehaltes nur bei einer ungehemmten Zersetzungstätigkeit gegeben.

Nach Untersuchungen von SCHELLER (1998) hängt die N-Nachlieferung des Bodens stärker von der Bodenstoffwechselaktivität ab, als vom Gesamtstickstoffgehalt. Je besser die Boden-

struktur, je größer die aktive mikrobielle Biomasse und je mehr leicht umsetzbare organische Substanz im Boden vorlag, desto mehr Nitratstickstoff wird in kurzer Zeit aus der organischen Substanz des Bodens freigesetzt.

Der Reliefeinfluss konnte auch anhand der Änderungen in der ermittelten Gehalte der betriebsüblich bewirtschafteten der Restfläche auf dem Schlag Lüttewitz nachgewiesen werden. Trotz einer ähnlichen Bodenbewirtschaftung wie in der Variante K traten Änderungen aufgrund der Lage im Mikrorelief auf.

Witterungsverlauf

In die Auswertung des N-Haushaltes und in die Sickerwasserberechnung sind die unterschiedlichen Witterungsverläufe der 3 Untersuchungsjahre eingeflossen. Nach SCHWEIGERT (1998) konnte eine deutliche Abnahme der N_{min} -Gehalte u.a auf Schluff- und Lehmböden mit zunehmenden Niederschlägen verzeichnet werden. Durch die erhöhten Niederschläge war ein verbesserte Nährstoffaufnahme und eine größere Nährstoffverlagerung durch Versickerung gegeben. Nach EICH & FRANKO (1990) werden auf Lößstandorten die Mineralisierungsintensitäten durch höhere Niederschläge deutlich verringert, wodurch den Kulturpflanzen weniger Stickstoff zur Verfügung steht. Durch eine Temperaturerhöhung wird die Mineralisationsintensität gefördert.

Es wurden deutliche Abweichungen zwischen den monatlichen Werten der Temperatur, des Niederschlages und der ET_{pot} zwischen einer lokalen Messstation und einer Referenzstation ermittelt. Damit wird deutlich, mit welchen Ungenauigkeiten gerechnet werden muss, wenn Werte unterschiedlicher Maßstabsebenen kombiniert werden sollen. Die Messwerte der Wasserspannung und des Wassergehaltes lagen für einzelne Punkte in der Mikroebene vor. Für deren Einordnung und Folgeberechnungen waren unbedingt lokale Messwerte zum Witterungsverlauf nötig. Jedoch sind für erste Einschätzungen zur KWB und für einen Vergleich mit anderen Regionen die Messwerte einer weiter entfernten Referenzstation zulässig.

Bei der Betrachtung der Abweichungen zwischen ET_{pot} und ET_{akt} wurde erkennbar, dass Abweichungen der ET_{akt} zur ET_{pot} vorrangig in den Sommermonaten auftraten. Die Abweichungen waren in der Variante P am stärksten ausgeprägt, da die geringe Bodenfeuchte als limitierender Faktor wirkte. Für die sickerungsrelevanten Winter- und Frühjahrszeiträume war die Berücksichtigung der aktuellen Evapotranspiration deshalb nicht relevant. Weiterhin ist in den Sommermonaten ein Entzug von Nitrat durch die Kulturpflanzen gegeben.

Wassergehalt

Es wurden charakteristische Unterschiede im Bodenwasserhaushalt zwischen den Varianten ermittelt. Dauerhaft pfluglose Bodenbearbeitungsverfahren ihre Vorteile im Hinblick auf die Wasserverfügbarkeit für den Pflanzenbestand insbesondere in anhaltend trockenen Perioden (LfL, 2000).

Die sehr trockenen Monate August und September 1999 führten zu starken Austrocknungen im Boden. In der Variante P fand bis 50 cm Tiefe eine Austrocknung bis in den Bereich schwer pflanzenverfügbares Wasser statt. Die Austrocknungen waren auch in den Varianten D und K erkennbar, jedoch bleibt das Wasser in den beiden Varianten tiefer pflanzenverfügbar. Die Unterschiede wurden im Pflanzenbestand sichtbar. Nach LfL (2000) waren im September 1999 in der Variante P im Gegensatz zu den anderen Varianten deutliche Welkerscheinungen zu erkennen. Im Jahr 1999 wurden in den Varianten P und K annähernd gleiche Erträge ermittelt, obwohl der Variante P eine wesentlich höhere N-Menge zur Verfügung stand. Dies könnte auf die höheren Wassergehalte in der Variante K zurückgeführt werden. Im trockenem Spätsommer und Herbst 1999 wies die Variante K die höchsten Wassergehalte im Unterboden auf. In diesem Zeitraum trocknet die Variante D im Unterboden stärker als die Variante P aus.

ENGEL & MANGSTL (1988) fanden in einer Fruchtfolge nach Zuckerrüben im Herbst die geringsten Wassergehalte. Durch diese Fruchtart fand eine starke Verringerung des Bodenwasservorrates statt. Weiterhin werden durch ihre Untersuchungen Kulturarten besonders kritisch beurteilt, bei denen eine frühe Ernte erfolgt. Dadurch können noch hohe N-Mengen im Boden vorhanden sein und es fehlt ein Nährstoff- und Wasserentzug durch die Pflanzen.

Im Jahr 2000 konnte in den nichtgepflügten Varianten durch die hohen Niederschläge im Frühjahr eine schnellere Aufsättigung als in der Variante P ermittelt werden. Dies war in der nicht so starken Austrocknung begründet. In der Schicht über 20 cm trockneten alle Varianten im Frühjahr und zu Beginn des Sommers gleich schnell und gleich stark aus. Durch die sehr trockenen Monate Juni und Juli 2000 wurden in allen Varianten Austrocknungserscheinungen verzeichnet. In den nichtgepflügten Varianten waren diese jedoch nicht so stark ausgeprägt wie in der Variante P. In der Variante P werden in den oberen 20 cm sogar Wassergehalte unter 14 Vol.-% erreicht. Dies führt zu einer Behinderung des Pflanzenwachstums. EHLERS (1973) berichtet auf einer Parabraunerde aus Lößlagen die Wassergehalte der Variante P bis

20 cm Tiefe in Trockenphasen deutlich unter denen der Variante D. In 60 cm und 80 cm Tiefe kehrte sich dieses Bild um.

Nach den starken Niederschlägen im August und September 2000 erfolgte in den nichtgepflügten Varianten eine Aufsättigung am schnellsten. Besonders in der Variante D wurde am schnellsten eine Aufsättigung in der Tiefe erreicht. Im Jahr 1999 war eine solche Aufsättigung nach Austrocknung in der Variante D nur langsam wahrnehmbar. Dies kennzeichnet das heterogene System Boden und den Zeitraum zur Einstellung einer eventuellen Regelmäßigkeit.

Im Jahr 2001 blieb die Variante D in den Tiefen unter 40 cm länger feucht als die anderen Varianten. Im Profilverlauf unter 20 cm Tiefe ähnelten sich die Varianten P und KL. Nur in der Tiefe unter 60 cm wies die Variante KL deutlich höhere Wassergehalte auf. Im Mai 2001 waren in allen Varianten Austrocknungserscheinungen bis auf Wassergehalte von 16 - 24 Vol.-% zu erkennen. In der Variante D erfasste die Austrocknung die obersten 10 cm. In den Varianten K und KL waren die obersten 30 cm bzw. 35 cm betroffen. In der Variante P wurden diese Austrocknungserscheinungen bis 60 cm Tiefe gemessen.

Für den höheren Wassergehalt der nichtgepflügten Varianten kann die Verminderung der Verdunstung durch die Mulchschicht angeführt werden. Nach BUCHNER & KÖLLER (1990) erwärmen sich feuchte Böden langsamer, führen jedoch, durch die günstigere Wärmeleitfähigkeit, die eingestrahlte Energie zügiger in den Unterboden ab. Mögliche Gründe für den höheren Wassergehalt der nichtgepflügten Varianten sind ein unterschiedlicher Wasserentzug im Vorsommer durch langsamere Pflanzenentwicklung und eine Transpiration des Pflanzenbestandes sowie eine höhere Wasserkapazität aufgrund der höheren Trockenrohdichtedifferenzierte.

Wasserspannung

Nach HARTGE & HORN (1989) ist für die Pflanzenwasserversorgung die Wasserbindung wichtiger als die Wassermenge. Wasserspannung und Wassergehalt Rückschlüsse auf den Wasserhaushalt des Bodens zu. Im Boden findet ständig eine Wasserbewegung statt, da eine Einstellung eines Fließgleichgewichtes durch Niederschläge und Evapotranspiration verhindert wird (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 1998).

Zur Charakterisierung dieser Wasserbewegung wurden die Saugspannungen gemessen und der hydraulische Gradient berechnet. Unterschiede der Wasserspannungen in den untersuchten Ebenen 30 cm, 60 cm und 80 cm traten deutlich während Austrocknungsphasen auf. Ent-

scheidend war die Wasserverfügbarkeit in den Zeiträumen, in welchen das Wasser am dringendsten von den Kulturpflanzen gebraucht wird. Dabei sind nicht geringe Unterschiede zwischen den Varianten, sondern nennenswerte Unterschiede im ökologisch wirksamen Bereich von Interesse.

Im Frühjahr 1999, welches in den Monaten März und April sehr trocken war, waren die nichtgepflügten Variante auch in allen Bodentiefen deutlich feuchter. Durch die höheren Wassergehalte und niedrigeren Saugspannungen stand den im April gesäten Zuckerrüben eine optimale Versorgung zur Verfügung. Jedoch bedeuten die geringeren Saugspannungen in den größeren Tiefen auch ein Sickerwasser- und N-Austragspotenzial.

In der Variante P wurde in der Ebene 30 cm bereits Anfang Juni 1999 die Stufe von schwer pflanzenverfügbarem Wasser erreicht. Deutlich später geschah dies in den Varianten D und K. Von Juli bis Ende September 1999 waren keine Unterschiede zwischen den Varianten in 30 cm Tiefe zu erkennen.

Im Herbst 2000 wies die Variante P die höchsten Saugspannungen in der Tiefe 30 cm auf. Jedoch lagen die Werte der Varianten K und KL nur geringfügig darunter und im Bereich von schwer pflanzenverfügbarem Wasser. In der Variante D fielen die gemessenen Saugspannungen der Tiefe 30 cm in den Bereich von leicht pflanzenverfügbarem Wasser.

Im Januar 2001 unterschritt die Variante D zuerst die Grenze von pF 1,8. In der Variante P wurde dies erst im März ermittelt. Anschließend erfolgte ein Ansteigen der Saugspannungen in den Sommermonaten. Hier wies die Variante D pF -Werte im Bereich von leicht pflanzenverfügbarem Wasser auf, wogegen in den anderen Varianten die Saugspannung im Bereich schwer pflanzenverfügbar lag.

In den Tiefen 60 cm und 80 cm waren die Verläufe der Saugspannungen denen der Ebene 30 cm ähnlich. Auch hier wies die Variante D häufig die geringsten Saugspannungen auf. In Austrocknungsphasen wiesen die Varianten K und KL teilweise geringere Saugspannungen im Vergleich zur Variante P auf.

Die Abnahme der Saugspannungen und Zunahme der Wassergehalte in den unteren Bodentiefen ist in der Austrocknung eines Bodens von oben begründet. Teilweise traten in einzelnen Zeiträumen keine nennenswerten Unterschiede der Saugspannungen zwischen den Varianten auf. Diese Aussagen beziehen sich auf die Verfügbarkeit der Wasserreserven. Bei den durch-

geführten Berechnungen der Sickerwassermengen und der daraus resultierenden Nitratfracht waren solche Unterschiede jedoch entscheidend.

Sickerwasser

In der Ebene 30 cm wies hauptsächlich die Variante P die geringsten und die Variante D die höchsten Sickerwassermengen auf. Die Varianten K und KL wiesen in der Tiefe 60 cm die höchsten Sickerwassermengen auf. Dies war durch die höheren Wassergehalte der nichtgepflügten Varianten zu begründen. Eine hohe Versickerung ist in der Tiefe von 30 cm und 60 cm nicht negativ zu bewerten, da diese Wassermengen noch keinem Austrag aus der durchwurzelten Zone unterliegen.

Von entscheidender Bedeutung waren die ermittelten Sickerwassermengen über die Winter- und in der Frühjahrsperiode, da in diesen Zeiträumen keine Nitrataufnahme durch die Kulturpflanzen erfolgt und gelöstes Nitrat ausgetragen werden kann. Die Berechnung der Sickerwassermengen der Ebene 80 cm erfolgte unter Einbezug der Versickerungsmöglichkeit anhand des hydraulischen Gradienten. Die Varianten P und D lagen mit jeweils 422 mm Sickerwasser in beiden Winter- und Frühjahrsperioden auf gleichem Niveau. In der Varianten K wurden mit 407 mm die geringsten Sickerwassermengen der Ebene 80 cm ermittelt. Die Sickerwassermengen der Variante KL lagen im Mittel.

Dagegen fand RICHTER (1995) bei seinen Untersuchungen auf einer Parabraunerde keine größeren Unterschiede zwischen den Sickerwassermengen der Tiefen 40 cm und 120 cm im Vergleich der Varianten Pflug, Flügelschargrubber und Direktsaat.

Aus dem hydraulischen Gradienten der Ebene 100 – 130 cm konnte auf eine Tiefensickerung der berechneten Sickerwassermengen geschlossen werden. Durch den hydraulischen Gradienten konnten keine lateralen Wasserbewegungen berücksichtigt werden.

Nitrataustrag

Die ermittelten Unterschiede im Sickerwasseranfall der Ebene 80 cm waren zwischen den Varianten gering. Jedoch wurden durch die differenzierten N_{min} -Gehalte in der Bodenlösung und in den Bodenproben deutliche Unterschiede in der potenziellen Nitratfracht ermittelt. Nach HÜTSCH & MENGEL (1989) wird durch die wendende Bodenbearbeitung das natürliche Gefüge gestört, das Sickerwasser bleibt länger in der Ackerkrume und kann mehr Nitrat

aus feineren Poren herauslösen. Dies konnte in den eigenen Untersuchungen durch die erhöhte Austräge in der Variante P bestätigt werden.

Die Nitratfrachten für den Untersuchungsschlag Lüttewitz konnten aus der berechneten Sickerwassermenge der Ebene 80 cm und dem Gehalt der Bodenlösung der Tiefe 90 cm bestimmt werden. Die Konzentration der Bodenlösung in der Saugkerze gibt dabei das Ende eines Stoffumsatzprozesses wieder. In den Winterperioden erfolgte die Abschätzung des Austrages über die Veränderung des NO_3 -Gehaltes in den Bodenproben. Eine Summenbildung aus beiden Prozessen war nicht möglich, da sich die Zeiträume gering überschneiden. In den zwei Winterperioden wurden in der Variante P ca. 10 kg N/ha und in den zwei Frühjahrsperioden ca. 1,7 kg N/ha mehr als in der Variante K ausgetragen. Die Nitratfracht der Variante KL lag im Mittel. Die Variante D wies geringe winterliche, aber teilweise hohe Frühjahrsausträge auf. Für die Variante D konnte kein sicherer Trend ausgemacht werden. Die Variante K wird in Bezug auf den verringerten Nitrataustrag als günstigste Variante empfohlen. Insgesamt muss aber festgehalten werden, dass die berechneten Nitratausträge in allen Varianten eher gering waren.

Ebenso fanden GOSS et al. (1988) bei ihren Untersuchungen zum Nitrataustrag auf einem Tonboden in einer Region mit einer vergleichbarer Niederschlagsmenge einen erhöhten Austrag der in Variante Pflug im Vergleich zur Variante Direktsaat. Hier traten in der Winter- und Frühjahrsperiode jährlich bis zu 18 kg N/ha höhere Austräge in der Variante P auf, wobei in 6 Untersuchungsperioden größere Variationen auftraten. Auch RICHTER & TEBRÜGGE (1997) fanden bei ihren Untersuchungen der Bodenbearbeitungsvarianten Pflug, Flügelschargrubber und Direktsaat in 3 Winterperioden auf einem Lehmboden deutlich geringere Nitratfrachten in der Variante Direktsaat als in den beiden bearbeiteten Varianten. Sie führen jedoch eine standortangepasste N-Düngung zur Vorfrucht und einen herbstlichen Pflanzenbestand als effektivere Methoden zur Verringerung des Nitrataustrages an. Zwar ermittelte KOHL (1989) bei seinen Untersuchungen der Bearbeitungsvarianten Pflug, Direktsaat und Flügelschargrubber-Rotoregge auf einer Tschernosem-Parabraunerde mit vergleytem Unterboden aus Löß eine deutliche Differenzierung der Nitratausträge in 40 und 60 cm Tiefe. Jedoch waren hier in 90 cm Tiefe nur unwesentliche Unterschiede festzustellen.

Weiterhin ist entscheidend, ob Nitrat aus der berechneten Ebene 80 cm noch von den Kulturpflanzen aufgenommen werden kann. Nach LfL (2001) wurde besonders in den Tiefen unter 60 cm in den Varianten D und K eine höhere Durchwurzelungsintensität bei Zuckerrüben im

Jahr 1999 ermittelt. Nach STREBEL & DUYNISVELD (1989) konnten bei Zuckerrüben auf einer Löß-Parabraunerde bis in 150 cm Nitrataufnahmen nachgewiesen werden. Bei günstigen Feuchtegehalt in oberflächennahen Schichten beschränken sich die Pflanzen auf diese. Je mehr diese Schichten verarmen, desto stärker werden die Unterbodentiefen für die Wassernachlieferung genutzt (TENHOLTERN & SEIFFERT, 1999). Nach Angaben von RICHTER & TEBRÜGGE (1997) erfolgt die Wurzelentwicklung und die N-Aufnahme der Pflanzen bei reduziert bearbeiteten zu Vegetationsbeginn langsamer. Durch die intensivere Unterbodendurchwurzelung wirkt die Wassernachlieferung intensiver bis in die Abreife hinein.

Weiterhin wurden die verfügbaren N-Mengen und Erträge des Untersuchungsschlages Lüttelewitz verglichen. In der Variante D wurde in allen 3 Jahren der geringste Ertrag erwirtschaftet. Die nichtgepflügten Varianten K und KL lieferten trotz geringerer bodenbürtiger N-Mengen, vergleichbare Erträge zu denen der Variante P. Daraus kann auf eine bessere Umsetzung des Stickstoffs und günstigere Nachlieferung aus dem Boden geschlossen werden. Nach FREDE & DABBERT (1998) soll der Ertragseffekt unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme jedoch erst nach langjährigen Untersuchungen beurteilt werden. In Kurzzeitversuchen werden nach Angaben der Autoren anfängliche Ertragsnachteile überbewertet.

Reliefeigenschaften

Die Bodenmerkmale und reliefbedingten Gegebenheiten bilden nach HONISCH (1996) innerhalb einer Landschaft die Summe von Potenzialen, welche den Stoffhaushalt maßgeblich beeinflussen. Von weiterer Bedeutung für den Landschaftshaushalt war die anthropogene Inanspruchnahme der Bodenfunktionen. Nach Ausführungen von FREDE & DABBERT (1998) weisen konkav-gestreckte Hänge im Vergleich zu gestreckten Hängen einen geringeren Bodenabtrag auf. Auf konvex-gestreckten Hängen erodiert hingegen mehr Boden. Nach Untersuchungen von WESSOLEK et al. (1994) auf Lößböden hängen die Wasserhaushaltskomponenten stark von Hangposition, Relief und Mächtigkeit der Lößauflage ab. Berechnungen ergaben, dass die ETakt auf der Hangkuppe jährlich bis zu 30 mm höhere Werte lieferte als am Hangfuß. Nach Ausführungen der Autoren herrschen an Südhängen höhere Lufttemperaturen und geringere Luftfeuchten vor. Weiterhin war die Grundwasserneubildung stark von der Exposition abhängig.

Der Wärmehaushalt des Bodens ist nach HARTGE & HORN (1989) durch die Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit bestimmt. Diese Größen sind wassergehaltsabhängig. Der Wassergehalt wird u.a. durch die Exposition und die Inklination bestimmt. Diese Unterschiede

konnten durch eine Relieffanalyse ermittelt und bewertet werden. Es wurde deutlich, von welchen Strukturen die Oberfläche des Untersuchungsschlages durchzogen wird. Bereiche, welche aus einer Darstellung der Höhengschichten als Senke ausgemacht wurden, konnten durch die Relieffanalyse deutlich gegliedert dargestellt werden. Innerhalb dieser größeren Senkenbereiche waren Zwischensenken erkennbar.

Nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1998) sind Stofftransporte im Boden in ebener Lage überwiegend vertikal orientiert. In Hanglagen werden Stofftransporte begünstigt, die lateral bzw. oberflächenparallel orientiert sind.

Nach NEUMEISTER (1999) wird bei Stoffumsatzprozessen nicht primär nach dem Parameter gefragt, vielmehr steht der Eintragspfad als Ausschnitt aus dem Geoökosystem im Mittelpunkt. Durch ein Verfahren, welches bei der Wahl der Beprobungspunkte den Pfad des Stoffeintrags beachtet, wird eine Sensibilität erreicht, welche die Abbildung der Raumdifferenzierung ermöglicht.

Durch die höhengschichtenangepasste Probenahme und die Betrachtung von Konvergenzbereichen wurde die Bewertung der Parameter des C/N-Verhältnisses innerhalb des Untersuchungsschlages präzisiert. Für die einzelnen stationären Messplätze wurden durch die Relieffanalyse vergleichbare Bedingungen ermittelt.

Bei der Anlage von Messstationen auf Praxisparzellen dieser Größe waren Unterschiede in der räumlichen Lage aufgrund der Heterogenität eingeschlossen. Bei der im Mittelsächsischen Lößhügelland natürlich bedingten Feingliedrigkeit des Reliefs sind diese Unterschiede als normal zu erachten. Bei der Anlage der Messstationen vor Ort war eine Einschätzung einer homogenen Lage der Messstationen aus dem Blickwinkel auf lokaler Ebene nur bedingt möglich. Eine verbesserte Möglichkeit bietet hier die digitale Relieffanalyse. Durch die Auswertung konnte u.a. geprüft werden, ob eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse der Stationen erlaubt war bzw. wie die Ergebnisse bewertet werden können. Im Fall der Verwendung eines DGM müssen die Zielstellung sowie Kosten und Nutzen bedacht werden. In einem feingliedrigem Relief wie dem Vorliegendem, waren präzisere Aussagen und Einschätzungen der Untersuchungen durch Verwendung eines DGM möglich.

KRAMER (1989) bewertete im Gebiet des Mittelsächsischen Lößhügellandes die natürliche Funktion der Dellen als Entwässerungs- und Massenabzugsbahnen. Starkregen im Frühjahr und Frühsommer führen im Mittelsächsischen Lößhügelland zu einer raschen Abflussbildung und einem konzentrierten Transport in den Dellengründen. Durch diesen konzentrierten

Transport kann es zur Ausbildung von Flutbahnsystemen mit räumlich weitreichenden Schadensmustern kommt. Er ermittelte deutliche Zunahmen der Humusgehalte an den Dellengründen. Dies bedeutet eine irreversible Beeinträchtigung der fruchtbarkeitsbestimmenden Faktoren im Hangbereich.

In allen Varianten waren auf dem Schlag Lüttewitz Verkürzungen der betrachteten Horizonte im Mittelhangbereich zu erkennen. Insgesamt waren in den nichtgepflügten Varianten und auf der beprobten Restfläche größere Mächtigkeiten des untersuchten Gesamthorizontes ausgebildet. Die Variante P wies die größten Heterogenitäten im Mikrorelief auf. Durch die Analyse der Horizontmächtigkeiten sind jedoch keine Aussagen zum unterschiedlich wirkenden Reliefeinfluss zwischen den Varianten möglich.

Eine Zunahme der Humusgehalte in den Dellengründen konnte auch durch eigene Untersuchungen bestätigt werden. In einem solchen reliefstarken Gelände ist besonders zu einem Erosionsschutz durch nichtpflügende Bearbeitung und Mulchsaat zu raten.

Für den Landwirt ist letztendlich entscheidend, ob geringere Bodenbearbeitung auch geringere Erträge zur Folge hat oder sonstige finanzielle Einbußen. Ein Konzept der Bodenbearbeitung macht letztendlich nur Sinn, wenn es unter Praxisbedingungen besteht. Das Bundesbodenschutzgesetz schreibt durch die Grundsätze der gP eine Vorsorgepflicht in Bezug auf eine nachhaltige Bodennutzung vor. Nach BMVEL (2001) müssen diese Handlungsempfehlungen wissenschaftlich abgesichert, und vor allem aufgrund praktischer Erfahrungen geeignet und wirtschaftlich tragbar sein.

Hier hat die vorliegende Diplomarbeit wissenschaftliche Ergebnisse für einen definierten Landschaftsraum geliefert. Insgesamt müssen Stoffhaushalts- und Bodenforschungsprojekte auf Langfristigkeit ausgelegt sein, weil die Landschaftsökosysteme langsam arbeiten. Durch das langfristige Verfolgen geökologischer Prozesse entstehen wichtige Aussagen zur Nachhaltigkeit von Produktionssystemen.

7 Literaturverzeichnis

AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN (1996): Anleitung zur Entnahme von Bodenproben. In: Geologisches Jahrbuch, Reihe G, 11, Informationen aus den Bund/ Länder-Arbeitsgruppen der Staatlichen Geologischen Dienste

AG BODEN, KA 4 (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. 4. Aufl., Hannover

APEL, B.; FRANKEN, H. (1990): Einfluss von Bodenbearbeitung und reduziertem Betriebsmitteleinsatz auf Bodengefüge und Nitratdynamik. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss., 3, 23 - 26

BEISECKER, R. (1994): Einfluss langjährig unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme auf das Bodengefüge, die Wasserinfiltration und die Stoffverlagerung eines Löß- und eines Sandbodens. Bodenökologie und Bodengenesse, 12, Dissertation, Berlin

BEVEN, K.; GERMAN, P. (1982): Macropores and Water Flow in Soils. Water Resources Research. Vol. 18, 5, 1311 - 1325

BRUNOTTE, J. (1991): Maßnahmen zum Bodenschutz im Zuckerrübenanbau. KTBL Arbeitspapier, 159, Darmstadt

BUCHNER, W; KÖLLER, K. (1990): Integrierte Bodenbereitung. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart

BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (BMVEL) (2001): Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen und Bodenerosion. Bonn

CLAUPEIN, W.; BAEUMER, K. (1990): Einfluss der Bodenbearbeitung auf den Stickstoffumsatz in Ackerböden. In: Akademie der Landwirtschaftswissenschaften. Tagungsbericht Nr. 295, Kohlenstoff- und Stickstoffdynamik im Boden, sowie Programme zur Steuerung der organischen Düngung, 145 - 159

CZERATZKI, W. (1973): Die Stickstoffauswaschung in der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion. Landbauforsch. Völkenrode, 1, 1 - 18

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e.V. [Hrsg.] (2000): Handbuch der Bodenuntersuchungen: Terminologie, Verfahrensvorschriften und Datenblätter; physikalische, chemische, biologische Untersuchungsverfahren; gesetzliche Regelwerke. Beuth; Berlin, Wien, Zürich

DOLESCHEL, P. (1992): Wie rentabel Erosionsschutz ist. DLG-Mitteilungen, 4, 62 - 64

DORAN, J.W. (1980): Soil microbial and biochemical changes associated with reduced tillage. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 765 - 771

DVWK (1985): DVWK Schriften 73 Bodennutzung und Nitratatrag. Hamburg, Berlin

DVWK (1990): Gewinnung von Bodenwasserproben mit Hilfe der Saugkerzen-Methode, DVWK-Merkblätter 217/1990, 12. S.

DVWK (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. Merkblätter zur Wasserwirtschaft. Band 238, Wirtschafts- und Verl.-Ges. Gas Wasser, Bonn

EHLERS, W. (1992): Reduzierte Bodenbearbeitung – Ökologische Folgen und ackerbauliche Grenzen. In: VDLUFA-Schriftenreihe 35, Kongressband 1992, 35 - 58

EHLERS, W. (1996): Wasser in Boden und Pflanze – Dynamik des Wasserhaushaltes als Grundlage von Pflanzenwachstum und Ertrag. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart

EICH, D.; FRANKO, U. (1990): C- und N-Dynamik in Ackerböden der DDR in Abhängigkeit von Standort, Fruchtfolge und organischer Düngung. Tagungsbericht „Kohlenstoff- und Stickstoffdynamik im Boden sowie Programme zur Steuerung der organischen Düngung“, 259, 27 - 34

ENGEL, T.; MANGSTL, A. (1988): Entwicklung des Nmin-Gehaltes im Herbst und Winter auf Praxisschlägen. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss., 1, 12 - 14

ESTLER, M.; KNITTEL, H. (1996): Praktische Bodenbearbeitung. DLG-Verlag, Frankfurt (Main)

FACHVERBAND STICKSTOFFINDUSTRIE e.V. (1961): Der Stickstoff – Seine Bedeutung für die Landwirtschaft und die Ernährung der Welt. Oldenburg Verlag, Stalling

FINK, A. (1982): Pflanzenernährung in Stichworten. Verlag Ferdinand Hirt, Kiel

FRAHM, B. (1985): Der Landwirt 1. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart

FRANKE, C.; NEUMEISTER, H. (1999): Räumliche Datendichte zur Abbildung der räumlichen Variabilität des pH-Wertes. Leipziger Geowissenschaften, 11, 105 - 112

FREDE, H.-G.; DABBERT, S. (1998): Handbuch zum Gewässerschutz in der Landwirtschaft. Ecomed Verlag, Landsberg

FRIELINGHAUS, M.; HÖFLICH, G.; JOSCKO, M; ROGASIK, H.; SCHÄFER, H. (1997): Auswertung eines Langzeitexperiments zu konservierender Bodenbearbeitung von Sandböden und Einschätzung des Erfolgs. Arch. Acker-Pfl. Boden, 41, 383 - 402

GARCÍA-TORRES, L.; MARTÍNEZ-VILELA, A.; SERRANO DE NOREÑA, F. (2001): Conservation Agriculture in Europe: current status and perspectives. In: GARCÍA-TORRES, L.; BENITES, J.; MARTÍNEZ-VILELA, A. (Hrsg.) (2001): Conservation Agriculture, A Worldwide Challenge, I. World Congress on Conservation Agriculture, Volume I, 80 - 83

GÖRLITZ, H.; Völker, U. (1990): Untersuchungen zur Nitrifikationsaktivität. Tagungsbericht „Kohlenstoff- und Stickstoffdynamik im Boden sowie Programme zur Steuerung der organischen Düngung“, 259, 49 - 56

GOSS, M.J.; COLBOURN, P.; HARRIS, G.L.; HOWSE, K.R. (1988): Leaching of nitrogen under autumn-sown crops and the effect of tillage. In: JENKINSON, D.S.; SMITH, K.A. (Hrsg.): Nitrogen efficiency in Agricultural Soils, 269 - 282

GREEN, W.-H.; AMPT, G.-H. (1911): Studies on soil physics. Part I.-The flow of air and water through soils. Journal of Agricultural Science, 4, 1 - 24

GROFFMANN, P.M. (1984): Nitrification and Denitrification in Conventional and No-Tillage Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49, 329 - 334

GROFFMANN, P.M.; HENDRIX, P.F; CROSSLEY, J. (1987): Nitrogen dynamics in conventional and no-tillage agroecosystems with inorganic fertilizer or legume nitrogen inputs. *Plant and Soil*, 97, 315 - 332

GROSSMANN, J.; QUENTIN, K.-E.; UDLUFT, P. (1987): Sickerwassergewinnung mittels Saugkerzen – eine Literaturstudie. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 150, 258 - 261

GROSSMANN, J. (1988): Physikalische und Chemische Prozesse bei der Probenahme von Sickerwasser mittels Saugsonden. Dissertation, Technische Universität München

HAASE, G. (1995): Das Mittelsächsische Lößhügelland. In: RICHTER, H.; MANNSFELD, K. (Hrsg.) (1995): *Naturräume in Sachsen. Forschungen zur Deutschen Landeskunde* 238. Trier

HARRACH, T.; RICHTER, U. (1992): Wirkung von Bodenbearbeitungsverfahren auf den Stickstoffhaushalt im System Boden – Pflanze. In: FRIEBE, B. (Hrsg.): *Wechselwirkungen von Bodenbearbeitungssystemen auf das Ökosystem Boden. Beiträge zum 3. Symposium vom 12.-13. Mai 1992 in Gießen*, 21 - 29

HÄRTEL, F. (1931): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Sachsen im Maßstab 1:25000, Blatt 47 Lommatzsch. 2. Auflage. Leipzig

HARTGE, K.H.; HORN, R. (1989): *Die physikalische Untersuchung von Böden*. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart

HAUDE, W. (1955): Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise. *Mitt. Dt. Wetterd.*, 11, 1 - 24

HOFFMANN, C. (1995): N-Mineralisation bei konservierender Bodenbearbeitung. *Zuckerribe*, 44. Jahrgang, 5, 236 - 238

HOFREITHER, M. (1996): Landwirtschaft und Nitrataustrag, Ökonomische Instrumente zum Schutz des Grundwassers. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Wasserwirtschaftskataster, Wien

HONISCH, M. (1996): Abhängigkeit des Wasser- und Stoffhaushaltes einer Lößlandschaft vom Standort und Bewirtschaftungsintensität. Hohenheimer Bodenkundliche Hefte, 38, 218 S.

HÜTSCH, B.; MENGEL, K. (1989): Einfluss unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme auf den Stickstoffumsatz im Boden und Nitratverlagerung. In: Justus - Liebig – Universität Gießen (1989): Wechselwirkungen von Bodenbearbeitungssystemen auf das Ökosystem Boden, Symposiumsband, 119 - 133

KLUGE, G.; EMBERT, G. (1996): Das Düngemittel Recht – mit fachlichen Erläuterungen 1996. Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster-Hiltrup

KOHL, R. (1989): Einfluss langjährig differenzierter Bodenbearbeitung auf die Nitratverlagerung im Boden. In: Justus – Liebig - Universität Gießen (1989): Wechselwirkungen von Bodenbearbeitungssystemen auf das Ökosystem Boden, Symposiumsband, 135 - 145

KOHL, R.; HARRACH, T. (1991): Zeitliche und räumliche Variabilität der Nitratkonzentration in der Bodenlösung in einem langjährigen Bodenbearbeitungsversuch. Z. Kulturtech. Landentw., 32, 80 - 87

KÖRSCHENS, M. (1990): C-N-Langzeitdynamik im Statischen Düngeversuch Lauchstädt. Tagungsbericht „Kohlenstoff- und Stickstoffdynamik im Boden sowie Programme zur Steuerung der organischen Düngung“, 259, 81 - 90

KÖRSCHENS, M. (1995): Zur Frage optimaler Humusgehalte in Ackerböden. VDLUFA-Schriftenreihe, 40, 157 - 160

KÖRSCHENS, M.; SCHUL, E.; KLIMANEK, E.V.; FRANKO, U. (1997): Die organische Bodensubstanz – Bedeutung, Definition, Bestimmung. Arch. Acker – Pfl. Boden, 41, 427 - 433

KÖRSCHENS, M. (1997): Abhängigkeit der organischen Bodensubstanz (OBS) von Standort und Bewirtschaftung sowie Einfluss auf Ertrag und Bodeneigenschaften. Arch. Acker – Pfl. Boden, 41, 435 - 463

KRAMER, M. (1989): Zur natürlichen Funktion von Dellen in landschaftlichen Geländeschlägen des Mittelsächsischen Lößhügellandes. In: Geographie – Ökonomie – Ökologie, Wechselbeziehungen von Gesellschaft und Natur. 1. Auflage, Gotha

KRÜCK, S.; NITZSCHE, O.; SCHMIDT, W. (2001): Regenwürmer vermindern Erosionsgefahr. Landwirtschaft ohne Pflug, 1, 18 – 21

KRÜCK, S.; NITZSCHE, O.; SCHMIDT, W.; UHLIG, U. (2001): Einfluss der Bodenbearbeitung auf Bodenleben und Bodenstruktur. Mitt. Der dt. Bodenkundl. Gesellschaft, 96 (2), 747 - 748

KUNTZE, H. (1983): Zur Stickstoffdynamik in landwirtschaftlichen Böden. In: Nitrat - ein Problem für unsere Trinkwasserversorgung?. Arbeiten der DLG 177, 25 - 37

KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT (KTBL) (1993): Definition und Einordnung von Verfahren der Bodenbearbeitung und Bestellung. Landtechnik, 48 (1/2), 50 - 53

KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT (KTBL) (1998): Bodenbearbeitung und Bodenschutz – Schlussfolgerungen für die gute fachliche Praxis. Arbeitspapier 266, Reinheim

LEIFERT, C.; GOLDEN, M.H. (2000): A re-evaluation of the beneficial and other effects of dietary nitrate. Proceedings (International Fertiliser Society), 456, 115 - 131

LEIPZIGER VOLKSZEITUNG (LVZ) (2002): Wasserwerke regeln Boden-Belastung vertraglich. 25.07.2002

LIERMANN, R. (1999): Makroporenkartierung und Freilandtracerstudien als methodisches Konzept zum qualitativen Nachweis potentieller Transportpfade. Leipziger Geowissenschaften, 11, 113 - 122

- LÖPMEIER, F.J. (1994): Berechnung der Bodenfeuchte und Verdunstung mittels agrarmeteorologischer Modelle. *Zeitschrift für Bewässerungswirtschaft*, 29,2, 157 - 167
- MENGEL, K. (1991): Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze. Gustav Fischer Verlag. 7. Auflage, Jena
- NEUMEISTER, H. (1976): Stoffkonzentrationen, Stoffbewegungen und Fremdstoffe in landschaftlichen Prozessen und ihre Erkundungsprobleme. *Petermann's Geographische Mitteilungen*, 2, 145 - 148
- NEUMEISTER, H. (1988): Landschaftshaushalt und Geoökologie. *Petermann's Geographische Mitteilungen*, 2, 101 - 108
- NEUMEISTER, H. (1989): Geoökologie – Denk- und Arbeitsweise in den Geowissenschaften (Beispiel: Geoökologische Forschung in der Agrarlandschaft). *Petermann's Geographische Mitteilungen*, 2, 73 - 78
- NEUMEISTER, H. (1999): Methodischer Fortschritt in der umweltbezogenen geographischen Forschung. *Leipziger Geowissenschaften*, 11, 175 - 186
- NITZSCHE, O.; KRÜCK, S., SCHMIDT, W.; RICHTER, W. (2001): Reducing soil erosion and phosphate losses and improving soil biological activity through conservation tillage systems. In: GARCÍA-TORRES, L.; BENITES, J.; MARTÍNEZ-VILELA, A. (Hrsg.) (2001): *Conservation Agriculture, A Worldwide Challenge*, I. World Congress on Conservation Agriculture, Volume II, 185 – 189
- NITZSCHE, O. (2002): persönliche Mitteilung.
- PREUSSMANN, R. (1982): Nitrosaminbedingte Cancerogenese. In: *Nitrat-Nitrit-Nitrosamine in Gewässern*. Mitt. III der Komm. F. Wasserforschung, DFG, 143 - 148
- RICHTER, U. (1995): Einfluss langjährig differenzierter Bodenbearbeitungssysteme auf das Bodengefüge und den Stickstoffhaushalt. *Boden und Landschaft*, Bd. 4, Dissertation Universität Gießen

RICHTER, U.; TEBRÜGGE, F. (1997): Bearbeitung von Lehmböden und Gefügeveränderungen. In: Landbauforschung Völkenrode (1997), Sonderheft 178, 27 - 42

RIEß, F. (1993): Untersuchungen zur Nitratauswaschung nach mineralischer und organischer Düngung von Ackerland und Grünland mittels der Saugkerzen-Methode. Dissertation. Lehrstuhl für Pflanzenernährung an der Technischen Universität München in Friesing-Weihenstephan

SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAT (LfL) (2000): Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben Nr. 03395588 „Entwicklung von dauerhaft umweltgerechten Landbewirtschaftungsverfahren im sächsischen Einzugsgebiet der Elbe“. Berichtszeitraum 15.11.1998 – 31.12.1999. Leipzig

SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAT (LfL) (2001): Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben Nr. 03395588 „Entwicklung von dauerhaft umweltgerechten Landbewirtschaftungsverfahren im sächsischen Einzugsgebiet der Elbe“. Berichtszeitraum 01.09.1998 – 30.04.2001. Leipzig

SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, ERNÄHRUNG UND FORSTEN (SML) (1997): Ordnungsgemäßer Einsatz von Düngern entsprechend der Düngeverordnung. Dresden

SCHEFFER, B.; KUNTZE, H.; BARTELS, R. (1987): Einfluss des Nitrifikationshemmers „Didin“ auf die Stickstoffumsetzung und den Nitrataustrag in Sandböden. Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung, 28, 208 – 213

SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (1982): Lehrbuch der Bodenkunde. Ferdinand Enke Verlag, 11. Aufl., Stuttgart

SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (1998): Lehrbuch der Bodenkunde. Ferdinand Enke Verlag, 14. Aufl., Stuttgart

SHELLER, E. (1998): Steigerung der Stickstoffversorgung aus dem Humusvorrat – Stickstoff noch besser nutzen. Landwirtschaft ohne Pflug, 1, 5 - 9

SCHLICHTING, E.; BLUME, H.P.; STAHR, K. (1995): Bodenkundliches Praktikum. Blackwell Wissenschafts-Verlag Berlin, Wien. 2., neubearbeitete Auflage

SCHMALFUß, K. (1958): Pflanzenernährung und Bodenkunde. Hirzel Verlag, Leipzig

SCHMIDT, J.; MICHAEL, A.; VON WERNER, M.; SCHMIDT, W. (1996 a): Handbuch EROSION 2D/3D. Freiberg. Hrsg.: Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (LFUG)

SCHMIDT, W.; STAHL, H.; EIKENBUSCH, J. (1996 b): Bodenerosion durch Wasser – ein Maßnahmenkatalog. 2., neu bearbeitete Auflage. Hrsg.: Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Dresden

SCHMIDT, W.; NITZSCHE, O.; ZIMMERLING, B.; KRÜCK, S. (2000): Soil Erosion Control in Saxony. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 88, 569 - 572

SCHWEIGERT, P. (1998): Multiple Regressionsmodelle zur Witterungsabhängigkeit von Nmin-Werten: Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten. In: Agribiological Research, 51, 3, 253 - 260

SELLE, B. (2001): Neue Möglichkeiten zur Bewertung von Bodenerosion am Beispiel eines kleinen Einzugsgebiets im Mittelsächsischen Lößhügelland. Diplomarbeit. Universität Leipzig

SOMMER, C. (1999): Konservierende Bodenbearbeitung – ein Konzept zur Lösung agrarrelevanter Bodenschutzprobleme. In: Bodenschutz-Erhaltung, Nutzung und Wiederherstellung von Böden (1999), Organ des BVB, 15 –1 9

SPECHT, M.; STOCK, H.-G. (1994): Jahresverlauf des Nitratgehaltes im Boden bei langjährig differenzierter Stickstoffdüngungsintensität in verschiedenen Anbausystemen. Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, 7, 171 - 174

STADELMANN, F.X.; FURRER, O.J.; STAUFFER, W. (1981): Der Einfluss von Stickstoffmobilisierung, Nitrifikation und Düngung auf die Nitratwaschung ins Grundwasser. Vortragssammlung der Informationstagung „Nitrat im Gemüsebau und Landwirtschaft“ der GDI am 23.11.1981 in Rüslikon. 49 – 83

STAHL, H. (2002): persönliche Mitteilung.

STREBEL, O.; BÖTTCHER, J.; DUYNISVELD, W.H.M. (1984): Einfluss von Standortbedingungen und Bodennutzung auf Nitratwaschung und Nitratkonzentration des Grundwassers. Landwirtschaftliche Forschung, 37, 34 - 44

STREBEL, O.; DUYNISVELD, W.H.M. (1989): Nitrogen supply to cereals and sugar beet by mass flow and diffusion on a silty loam soil. Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 152, 135 - 141

TEEBKEN, T.; GÜNTHER-BORSTEL, O.; SIELING, K. (1994): N-Auswaschung – lässt sich ihre Höhe anhand der Nmin-Veränderungen über Winter abschätzen?. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss., 7, 229 - 232

TEIWES, K. (1997): Bodenkundliche Bestandsaufnahme auf Feldversuchsflächen der Südzucker AG zur Bodenbearbeitung. Unveröffentlichter Bericht

TENHOLTERN, R.; SEIFFERT, S. (1999): Diskussionsbeitrag zur Ermittlung der effektiven Durchwurzelungstiefe bei geschichteten Profilen. J. Plant Nutr. Soil Sci., 162, 457 - 461

TOPP, G.C.; DAVIS, J.L. (1985): Measurement of Soil Water Content using Time-Domain Reflectometry (TDR), A Field Evaluation. Soil Sci. Soc. Am. J., 49, 19 - 24

UHLIG, U. (2001): Erfassung der Makroporenzahl und -verteilung langjährig differenziert bearbeiteter Ackerflächen unter besonderer Berücksichtigung der Bodenerosion. Diplomarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden

VAN EIMERN, J.; HÄCKEL, H. (1979): Wetter- und Klimakunde. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart

VDLUFA-METHODENBUCH (1991): Die Untersuchung von Böden. VDLUFA-Verlag, Darmstadt, Bd. I, 4. Aufl., Bassler, R. (Hrsg.)

WEHRMANN, J.; SCHARF, H. (1979): Der Mineralstickstoffgehalt des Bodens als Maßstab für den Stickstoffdüngerbedarf (Nmin-Methode). *Plant and Soil*, 52, 109 - 129

WANTULLA, A. (1987): Möglichkeiten zur Verringerung des Nitrataustrages bei Gülleanwendung in einer Silomais-Monokultur durch Anbau von Zwischenfrüchten und dem Einsatz von Dicyandiamid. Inaugural-Dissertation, Bonn

WENDLING, U.; SCHELLIN, H.-G.; THOMÄ, M. (1991): Bereitstellung von täglichen Informationen zum Wasserhaushalt des Bodens für die Zwecke der agrarmeteorologischen Beratung. *Z. Meteorol.*, 41, 6, 468 – 475

WESSOLEK, G.; ROTH, C.; KÖNIG, R.; RENGER, M. (1994): Influence of slope and exposition on water balance of loess soils. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 157, 165 - 173

ZHANG, H. (1991): Der Einfluss von organischer Substanz auf die mechanischen Eigenschaften von Böden. Dissertation A. Universität Hannover

Software

AGROCOM: AGRO-Map Professional 3.1. 2.50 Copyright © 1998 – 2001. All rights reserved

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, INC.: Arc View GIS 3.2, Copyright © 1992 – 1999. All rights reserved

GOLDEN SOFTWARE, INC. (USA): SURFER Version 7.0 Copyright © 1999. All rights reserved

KILLET, C. Softwareentwicklung GbR: Transdat Testversion 7.73

SCHMIDT, J.; VON WERNER, M.: Erosion 2D Version 4.0 – Modell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser. Copyright © 2001

WASY GmbH: WGEO Version 1.3a. Copyright © 1997

Karten

Geologische Karte von Sachsen 1:25000 (1931), Nr. 47 Blatt Lommatzsch, II. Auflage, Landesvermessungsamt Sachsen, Dresden

Messtischblatt 1:25000, Blatt 4845 Lommatzsch, Ausgabe 1914, unveränderter Nachdruck 1997, Landesvermessungsamt Sachsen, Dresden

Topographische Karte 1:10000 (N), Blatt 4845 SW Lüttewitz, 1. Auflage 1995, Landesvermessungsamt Sachsen, Dresden

Topographische Karte 1:25000 (N), Blatt 4845 Lommatzsch, 2. Auflage 1995, Landesvermessungsamt Sachsen, Dresden

Topographische Karte 1: 50000 (N), Blatt L 4944 Döbeln, 1. Auflage 1996, Landesvermessungsamt Sachsen, Dresden

8 Anhang

Tab. A 1. Bewirtschaftungsdaten im Untersuchungszeitraum – Variante P (Bearbeitungsmaßnahmen: Stoppelbearbeitung (ST), Grundbodenbearbeitung (GB), Saatbettbereitung (SB), Aussaat (A), Düngung (D), Herbizid-, Fungizid-, Insektizideinsatz (H, F, I), Ernte (E)).

Monat	ST	GB	SB	A	D	H, F, I	E
Aug 98	12.08.98	-	-	-	-	-	-
Sep 98	-	-	-	03.09.1998 ZW	-	-	-
Okt 98	-	29.10.98	-	-	-	-	-
Nov 98	-	19.11.98	-	-	-	-	-
Dez 98	-	-	-	-	-	-	-
Jan 99	-	-	-	-	-	-	-
Feb 99	-	-	-	-	-	-	-
Mrz 99	-	-	-	-	31.03.99	-	-
Apr 99	-	-	09.04.99	10.04.1999 ZR	-	26.04.99	-
Mai 99	-	-	-	-	-	10.05.1999;25.05.99;28.05.99	-
Jun 99	-	-	-	-	-	11.06.99	-
Jul 99	-	-	-	-	-	-	-
Aug 99	-	-	-	-	-	-	-
Sep 99	-	-	-	-	-	-	-
Okt 99	-	19.10.99	20.10.99	20./21.10.99 WW00	-	-	18.10.99
Nov 99	-	-	-	-	-	-	-
Dez 99	-	-	-	-	-	-	-
Jan 00	-	-	-	-	-	-	-
Feb 00	-	-	-	-	-	-	-
Mrz 00	-	-	-	-	-	-	-
Apr 00	-	-	-	-	07.04.00;29.04.00	07.04.00	-
Mai 00	-	-	-	-	19.05.00	-	-
Jun 00	-	-	-	-	02.06.00	02.06.00	-
Jul 00	-	-	-	-	-	-	-
Aug 00	16.08.00	-	-	-	-	-	14.08.00
Sep 00	-	27.09.00	-	29.09.2000 WW01	-	15.09.00	-
Okt 00	-	-	-	-	-	-	-
Nov 00	-	-	-	-	-	-	-
Dez 00	-	-	-	-	-	-	-
Jan 01	-	-	-	-	-	-	-
Feb 01	-	-	-	-	-	-	-
Mrz 01	-	-	-	-	-	-	-
Apr 01	-	-	-	-	05.04.01;20.04.01;27.04.01	05.04.01;27.04.01	-
Mai 01	-	-	-	-	30.05.01	17.05.01	-
Jun 01	-	-	-	-	-	-	-
Jul 01	-	-	-	-	-	-	-
Aug 01	16.08.01	-	-	-	22.08.01	-	14.08.01
Sep 01	-	-	-	04.09.01 ZW	-	-	-
Okt 01	-	29.10.01	-	-	-	-	-
Nov 01	-	-	-	-	-	-	-
Dez 01	-	-	-	-	-	-	-

Tab. A 2. Bewirtschaftungsdaten im Untersuchungszeitraum – Variante D (Bearbeitungsmaßnahmen: Stoppelbearbeitung (ST), Grundbodenbearbeitung (GB), Saatbettbereitung (SB), Aussaat (A), Düngung (D), Herbizid-, Fungizid-, Insektizideinsatz (H, F, I), Ernte (E)).

Monat	ST	GB	SB	A	D	H, F, I	E
Aug 98	-	-	-	-	-	-	-
Sep 98	-	-	-	03.09.1998 ZW	-	-	-
Okt 98	-	-	-	-	-	-	-
Nov 98	-	-	-	-	-	-	-
Dez 98	-	-	-	-	-	-	-
Jan 99	-	-	-	-	-	-	-
Feb 99	-	-	-	-	-	-	-
Mrz 99	-	-	-	-	31.03.99	30.03.99	-
Apr 99	-	-	09.04.99	10.04.1999 ZR	-	26.04.99	-
Mai 99	-	-	-	-	-	10.05.1999;25.05.99;28.05.99	-
Jun 99	-	-	-	-	-	11.06.99	-
Jul 99	-	-	-	-	-	-	-
Aug 99	-	-	-	-	-	-	-
Sep 99	-	-	-	-	-	-	-
Okt 99	-	-	-	20./21.10.99 WW00	-	-	18.10.99
Nov 99	-	-	-	-	-	-	-
Dez 99	-	-	-	-	-	-	-
Jan 00	-	-	-	-	-	-	-
Feb 00	-	-	-	-	-	-	-
Mrz 00	-	-	-	-	-	-	-
Apr 00	-	-	-	-	07.04.00;29.04.00	07.04.00	-
Mai 00	-	-	-	-	19.05.00	-	-
Jun 00	-	-	-	-	02.06.00	02.06.00	-
Jul 00	-	-	-	-	-	-	-
Aug 00	-	-	-	-	-	-	14.08.00
Sep 00	-	-	-	29.09.2000 WW01	-	15.09.00	-
Okt 00	-	-	-	30.11.2000 WW01	-	-	-
Nov 00	-	-	-	-	-	-	-
Dez 00	-	-	-	-	-	-	-
Jan 01	-	-	-	-	-	-	-
Feb 01	-	-	-	-	-	-	-
Mrz 01	-	-	-	-	-	-	-
Apr 01	-	-	-	-	05.04.01;20.04.01;27.04.01	05.04.01;27.04.01	-
Mai 01	-	-	-	-	30.05.01	17.05.01	-
Jun 01	-	-	-	-	-	-	-
Jul 01	-	-	-	-	-	-	-
Aug 01	-	-	-	-	22.08.01	-	14.08.01
Sep 01	-	-	-	04.09.01 ZW	-	-	-
Okt 01	-	-	-	-	-	-	-
Nov 01	-	-	-	-	-	-	-
Dez 01	-	-	-	-	-	-	-

Tab. A 3. Bewirtschaftungsdaten im Untersuchungszeitraum – Variante K (Bearbeitungsmaßnahmen: Stoppelbearbeitung (ST), Grundbodenbearbeitung (GB), Saatbettbereitung (SB), Aussaat (A), Düngung (D), Herbizid-, Fungizid-, Insektizideinsatz (H, F, I), Ernte (E)).

Monat	ST	GB	SB	A	D	H, F, I	E
Aug 98	12.08.98	-	-	-	-	-	-
Sep 98	-	-	-	03.09.1998 ZW	-	-	-
Okt 98	-	-	-	-	-	-	-
Nov 98	-	-	-	-	-	-	-
Dez 98	-	-	-	-	-	-	-
Jan 99	-	-	-	-	-	-	-
Feb 99	-	-	-	-	-	-	-
Mrz 99	-	-	-	-	31.03.99	30.03.99	-
Apr 99	-	-	09.04.99	10.04.1999 ZR	-	26.04.99	-
Mai 99	-	-	-	-	-	10.05.1999;28.05.99	-
Jun 99	-	-	-	-	-	11.06.99	-
Jul 99	-	-	-	-	-	-	-
Aug 99	-	-	-	-	-	-	-
Sep 99	-	-	-	-	-	-	-
Okt 99	-	-	20.10.99	20./21.10.99 WW 00	-	-	18.10.99
Nov 99	-	-	-	-	-	-	-
Dez 99	-	-	-	-	-	-	-
Jan 00	-	-	-	-	-	-	-
Feb 00	-	-	-	-	-	-	-
Mrz 00	-	-	-	-	-	-	-
Apr 00	-	-	-	-	07.04.00;29.04.00	07.04.00	-
Mai 00	-	-	-	-	19.05.00	-	-
Jun 00	-	-	-	-	02.06.00	02.06.00	-
Jul 00	-	-	-	-	-	-	-
Aug 00	16.08.00	-	-	-	-	-	14.08.00
Sep 00	-	27.09.00	-	29.09.2000 WW01	-	15.09.00	-
Okt 00	-	-	-	-	-	-	-
Nov 00	-	-	-	-	-	-	-
Dez 00	-	-	-	-	-	-	-
Jan 01	-	-	-	-	-	-	-
Feb 01	-	-	-	-	-	-	-
Mrz 01	-	-	-	-	-	-	-
Apr 01	-	-	-	-	05.04.01;20.04.01;27.04.01	05.04.01;27.04.01	-
Mai 01	-	-	-	-	30.05.01	17.05.01	-
Jun 01	-	-	-	-	-	-	-
Jul 01	-	-	-	-	-	-	-
Aug 01	16.08.01	-	-	-	22.08.01	-	14.08.01
Sep 01	-	-	-	04.09.01 ZW	-	-	-
Okt 01	-	-	-	-	-	-	-
Nov 01	-	-	-	-	-	-	-
Dez 01	-	-	-	-	-	-	-

Tab. A 4. Bewirtschaftungsdaten im Untersuchungszeitraum – Variante KL (Bearbeitungsmaßnahmen: Stoppelbearbeitung (ST), Grundbodenbearbeitung (GB), Saatbettbereitung (SB), Aussaat (A), Düngung (D), Herbizid-, Fungizid-, Insektizideinsatz (H, F, I), Ernte (E)).

Monat	ST	GB	SB	A	D	H, F, I	E
Aug 98	12.08.98	-	-	-	-	-	-
Sep 98	-	-	-	03.09.1998 ZW	-	-	-
Okt 98	-	-	-	-	-	-	-
Nov 98	-	-	-	-	-	-	-
Dez 98	-	-	-	-	-	-	-
Jan 99	-	-	-	-	-	-	-
Feb 99	-	-	-	-	-	-	-
Mrz 99	-	-	-	-	31.03.99	30.03.99	-
Apr 99	-	-	09.04.99	10.04.1999 ZR	-	26.04.99	-
Mai 99	-	-	-	-	-	10.05.1999;28.05.99	-
Jun 99	-	-	-	-	-	-	-
Jul 99	-	-	-	-	-	-	-
Aug 99	-	-	-	-	-	-	-
Sep 99	-	-	-	-	-	-	-
Okt 99	-	20.10.99	-	20./21.10.99 WW00	-	-	18.10.99
Nov 99	-	-	-	-	-	-	-
Dez 99	-	-	-	-	-	-	-
Jan 00	-	-	-	-	-	-	-
Feb 00	-	-	-	-	-	-	-
Mrz 00	-	-	-	-	-	-	-
Apr 00	-	-	-	-	07.04.00;29.04.00	07.04.00	-
Mai 00	-	-	-	-	19.05.00	-	-
Jun 00	-	-	-	-	02.06.00	02.06.00	-
Jul 00	-	-	-	-	-	-	-
Aug 00	16.08.00	-	-	-	-	-	14.08.00
Sep 00	-	27.09.00	-	29.09.2000 WW01	-	15.09.00	-
Okt 00	-	-	-	-	-	-	-
Nov 00	-	-	-	-	-	-	-
Dez 00	-	-	-	-	-	-	-
Jan 01	-	-	-	-	-	-	-
Feb 01	-	-	-	-	-	-	-
Mrz 01	-	-	-	-	-	-	-
Apr 01	-	-	-	-	05.04.01;20.04.01;27.04.01	05.04.01;27.04.01	-
Mai 01	-	-	-	-	30.05.01	17.05.01	-
Jun 01	-	-	-	-	-	-	-
Jul 01	-	-	-	-	-	-	-
Aug 01	16.08.01	-	-	-	22.08.01	-	14.08.01
Sep 01	-	03.09.01	-	04.09.01 ZW	-	-	-
Okt 01	-	-	-	-	-	-	-
Nov 01	-	-	-	-	-	-	-
Dez 01	-	-	-	-	-	-	-

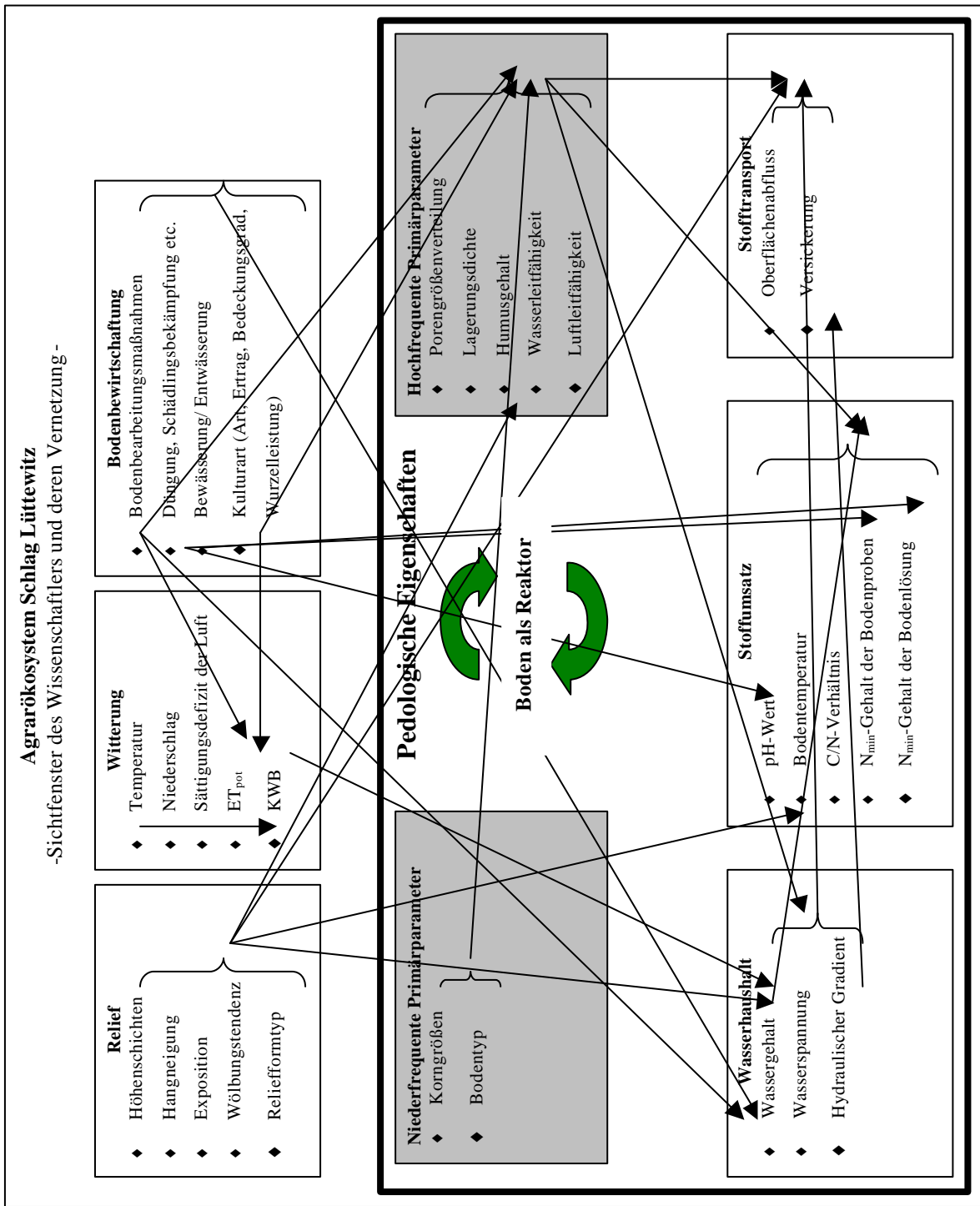


Abb. A 1. Agrarökosystem Schlag Lüttewitz.

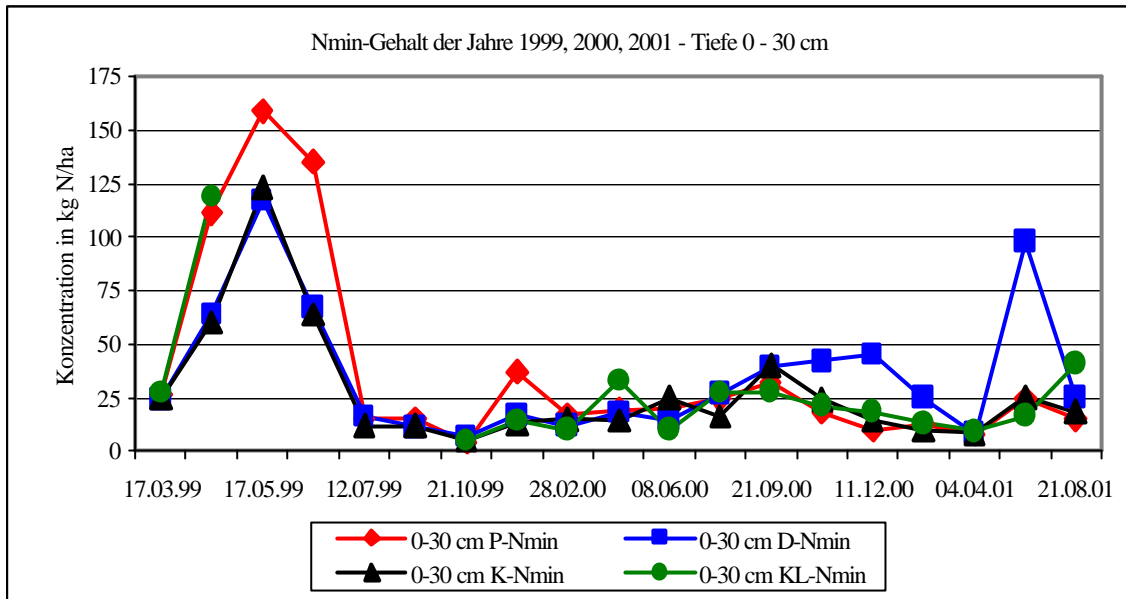


Abb. A 2. Nmin-Gehalte der Tiefe 0 – 30 cm im Vergleich.

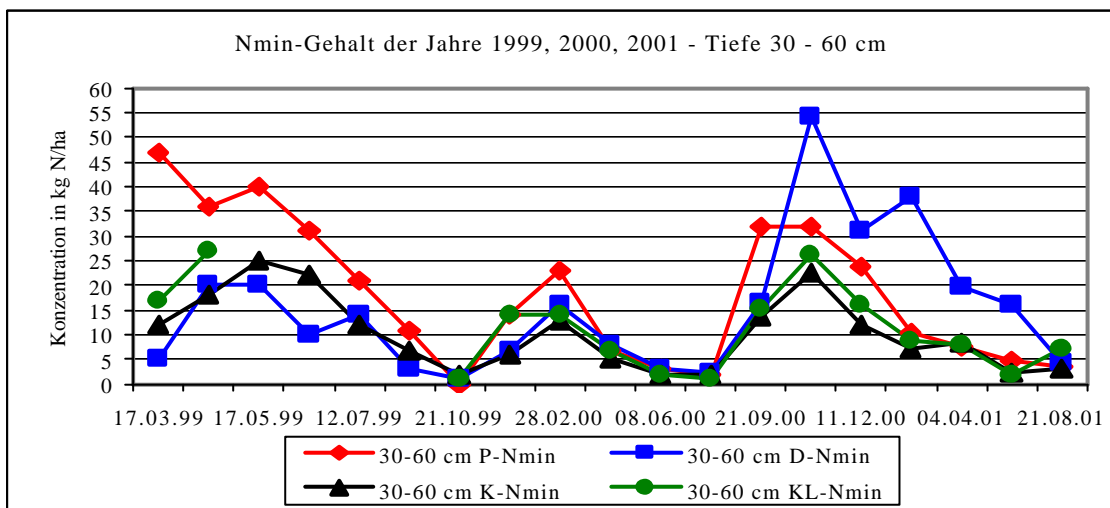


Abb. A 3. Nmin-Gehalte der Tiefe 30 – 60 cm im Vergleich.

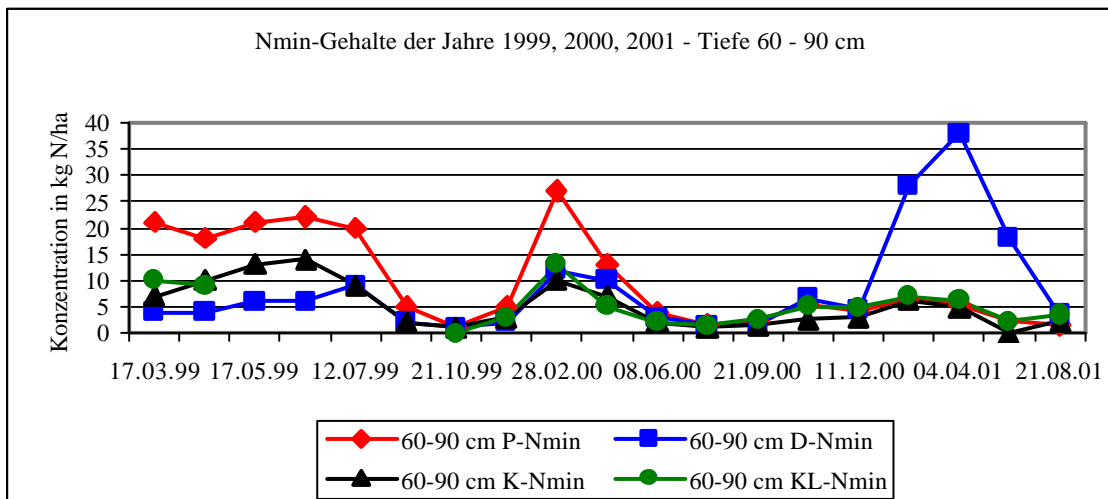


Abb. A 4. Nmin-Gehalte der Tiefe 60 – 90 cm im Vergleich.

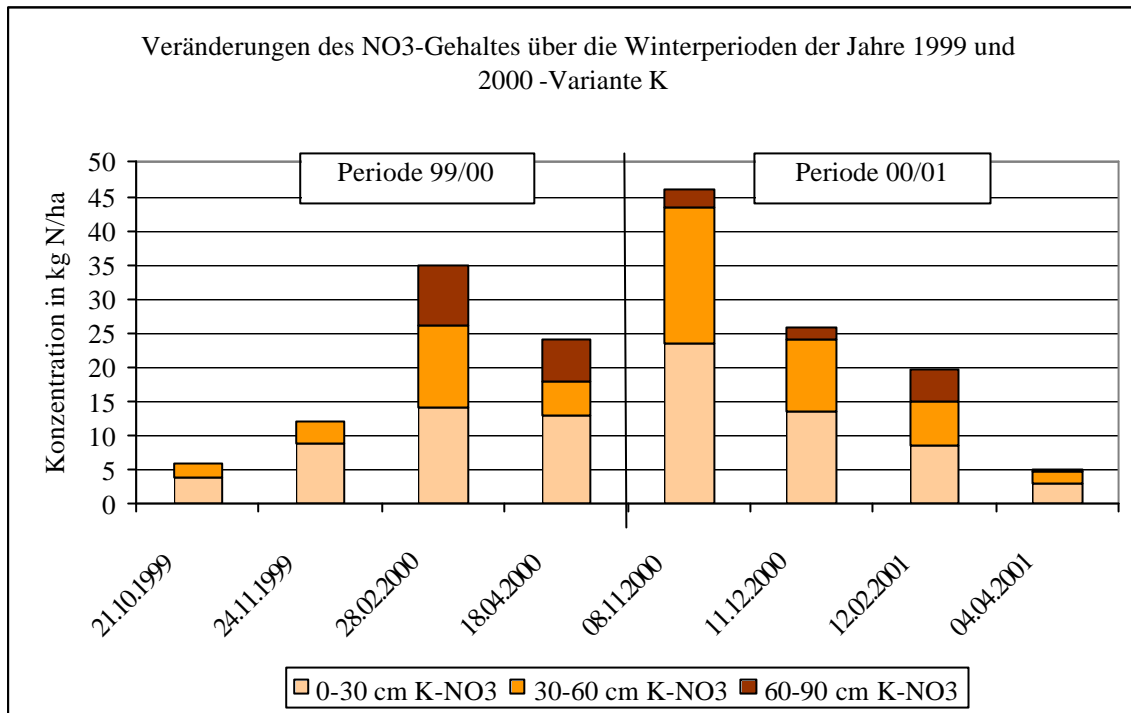


Abb. A 5. Veränderung des NO₃-Gehaltes der Bodenproben über die Winterperioden 1999 und 2000 in der Variante K.

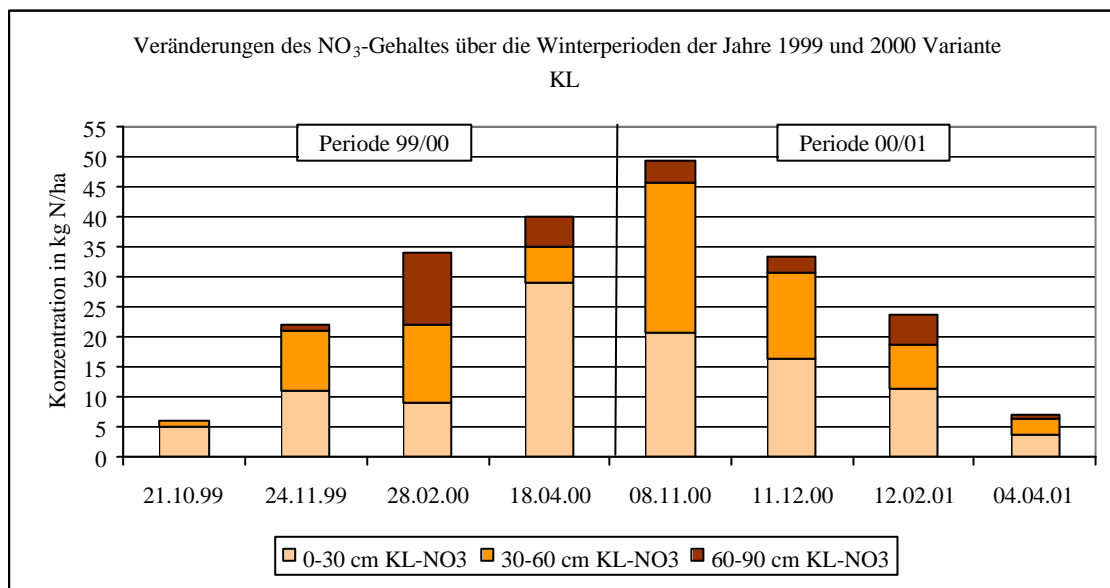


Abb. A 6. Veränderung des NO₃-Gehaltes der Bodenproben über die Winterperioden 1999 und 2000 in der Variante KL.

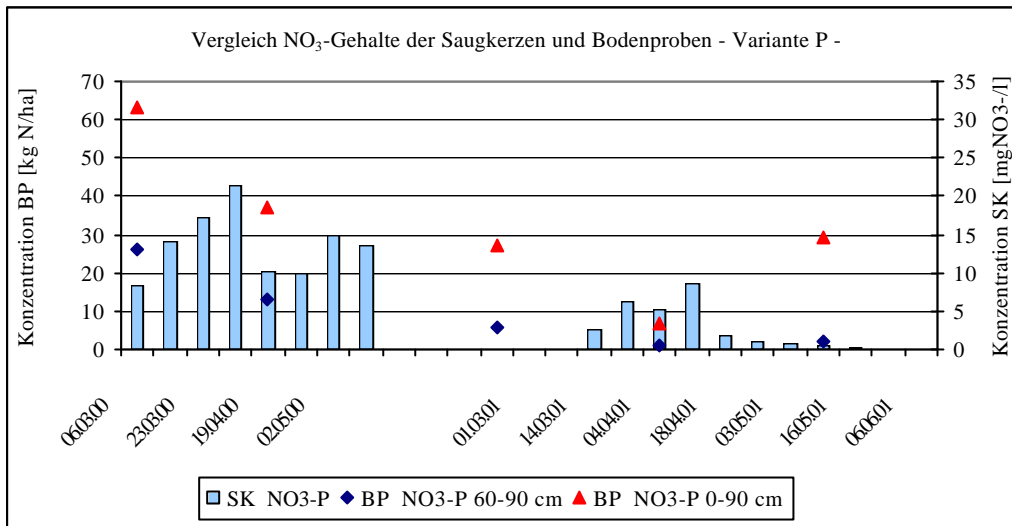


Abb. A 7. Vergleich der NO_3 -Gehalte der Saugkerzen (SK) und Bodenproben (BP) – Variante P.

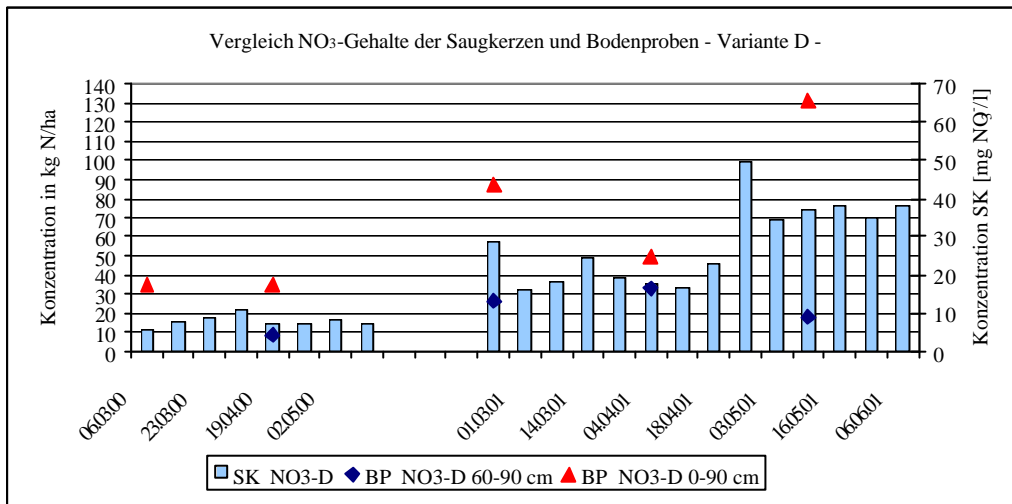


Abb. A 8. Vergleich der NO_3 -Gehalte der Saugkerzen (SK) und Bodenproben (BP) – Variante D.

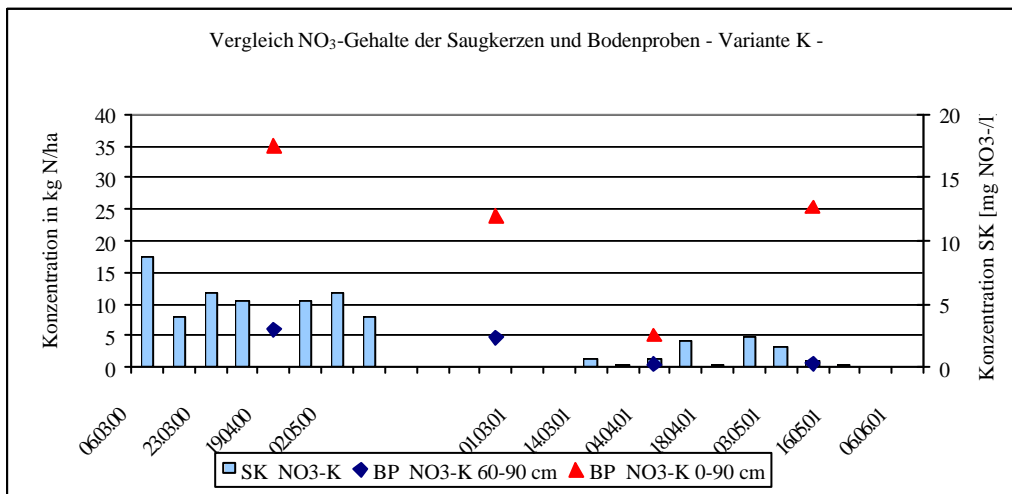


Abb. A 9. Vergleich der NO_3 -Gehalte der Saugkerzen (SK) und Bodenproben (BP) – Variante K.

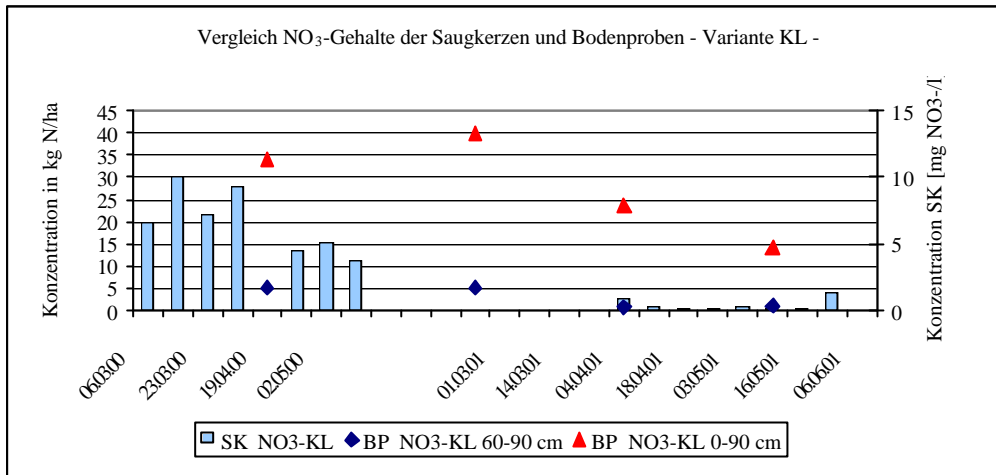


Abb. A 10. Vergleich der NO_3 -Gehalte der Saugkerzen (SK) und Bodenproben (BP) – Variante KL.

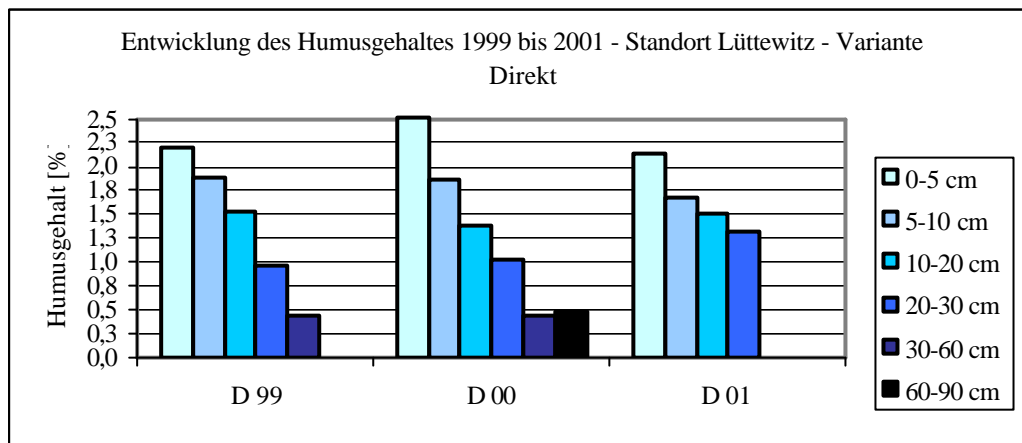


Abb. A 11. Humusgehalte der Variante D von 1999 bis 2001.

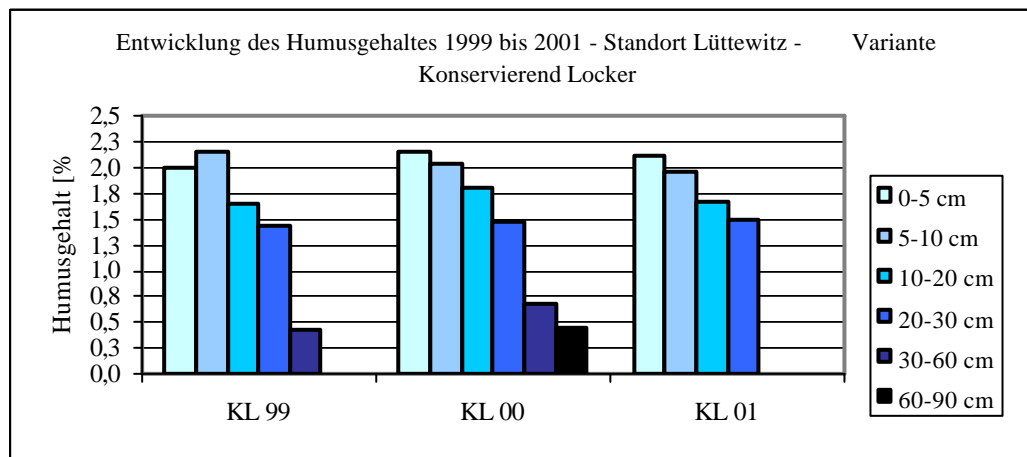


Abb. A 12. Humusgehalte der Variante KL von 1999 bis 2001.

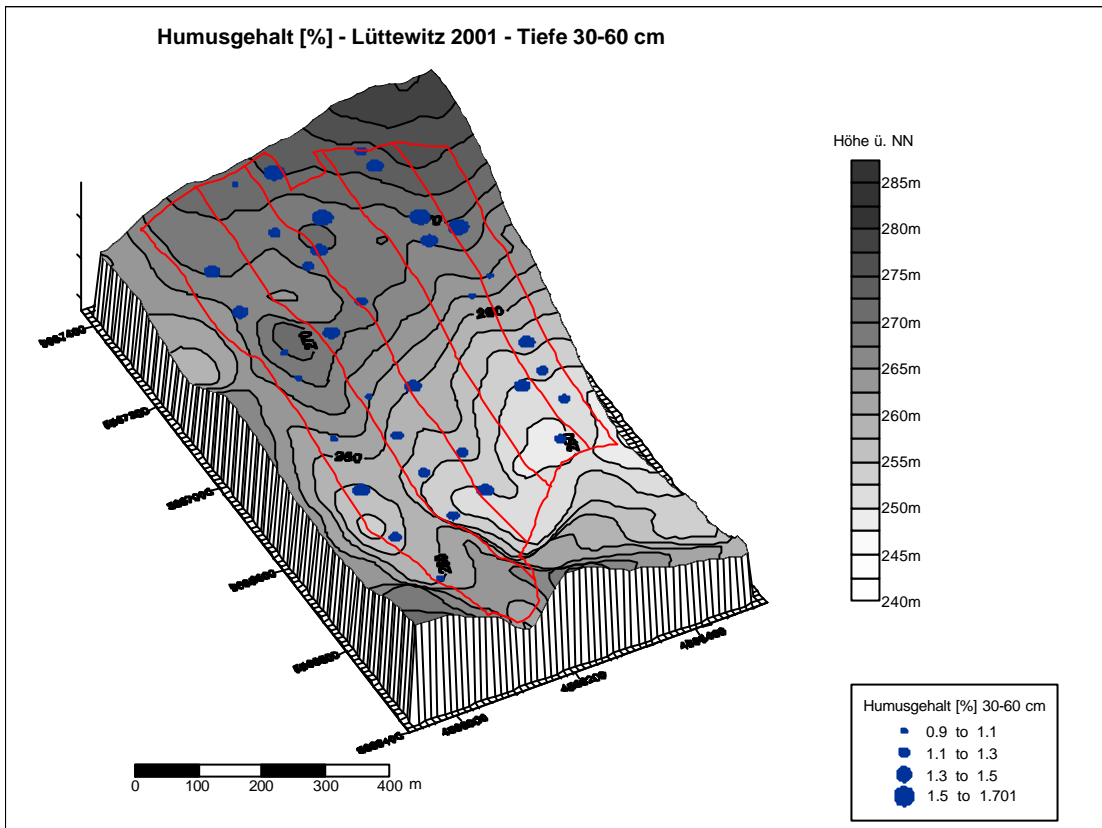


Abb. A 13. Humusgehalte der Tiefe 30 – 60 cm im Mikorelief.

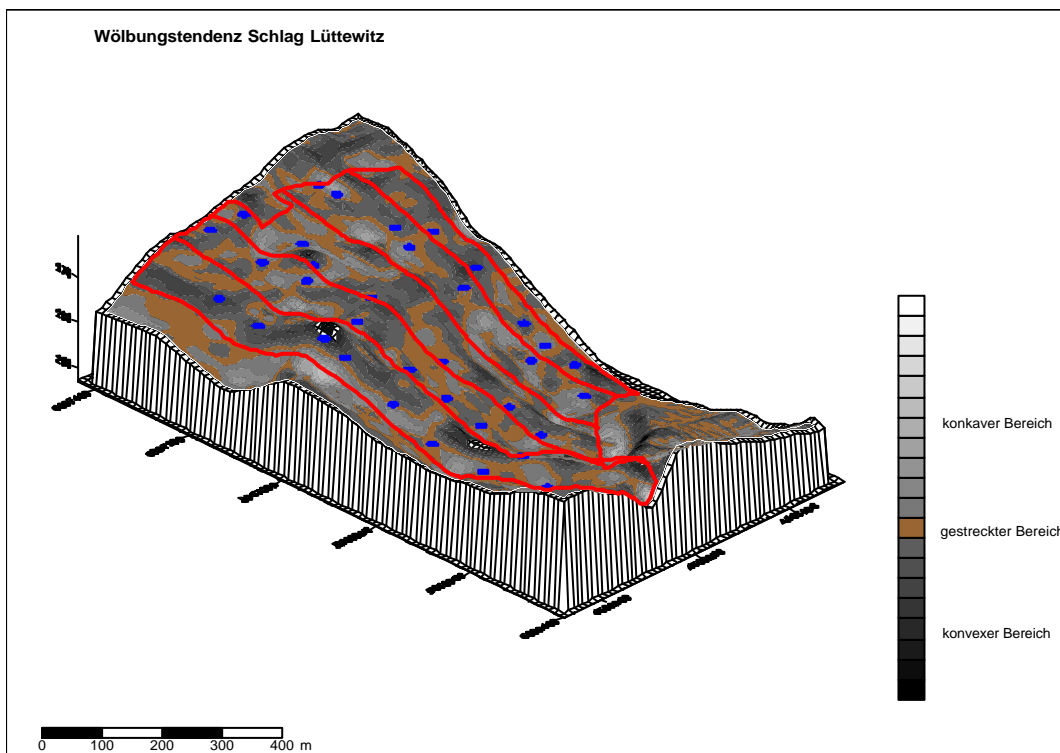


Abb. A 14. Wölbungstendenz Schlag Lüttewitz.